



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Senni Vels

**EPOKSIIDVAIGU MÕJU OKASPUIDU FÜÜSIKALIS-
MEHAANILISTELE OMADUSTELE**

**INFLUENCE OF EPOXY RESIN TO PHYSICO-MECHANICAL
PROPERTIES OF SOFTWOOD**

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Marko Teder, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Senni Vels		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Epoksiidvaigu mõju okaspuidu füüsikalise-mehaanilistele omadustele			
Lehekülgi: 77	Jooniseid: 26	Tabeleid: 16	Lisasid: 20
Osakond:		Maaehituse osakond	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Tsiiviilehitus, T220	
Juhendaja:		Marko Teder	
Kaitsmiskoht ja aasta:		Tartu, 2018	
<p>Käesolevas magistritöös uuriti epoksiidvaiguga töödeldud okaspuidu füüsikalise-mehaanilisi omadusi. Laboratoorsetes katsetes hinnati epoksiidvaiguga tugevdatud puidu paindetugevust ja vaiguga kaetud katsekehade ristikiudu survetugevust. Lisaks määrati katsekehade niiskussisaldus pärast leotamise ja kuivamise tsükleid.</p> <p>Katsed teostati vastavalt standarditele ISO 13061-3:2014, EVS-EN 317:2000 ja ISO 3132. Katsekehade puitmaterjaliks valiti kuusk ja mänd, mis on põhilised ehitusmaterjalina kasutatavad puiduliigid.</p> <p>Kolme punkti paindekatsed teostati selliselt, et nõrgestusena lõigatud soon jäi tõmbetsooni. Kuusele soone tegemine vähendas paindetugevust 42%, kuid männi puhul soone tegemine puitu märkimisväärselt ei nõrgestanud. Epoksiidvaiguga täidetud kuuse katsekehade paindetugevused olid samaväärsed tervik katsekehade tulemustega. Männi puhul olid kõikide katsekehade paindetugevused küllaltki sarnased, seega sarnast järeldust teha ei saa.</p> <p>Katsekehade niiskussisalduse mõõtmiseks teostati katsekehadele kuni kaks 24- tunnist leotamise ja kuivatamise tsüklit. Epoksiidvaiguga kaetud katsekehade niiskussisaldus oli kolm kuni viis korda väiksem katmata katsekehade omast. Tulemuste põhjal saab väita, et vaiguga katmine aitab ära hoida puitmaterjali liigniiskumise.</p> <p>Survekatsetel kasutati samu katsekehi, mis olid läbinud ligunemise ja kuivatamise tsüklid, et tõestada, kui palju keskkonnatingimused puidu survetugevust mõjutavad. Ristikiudu survekatsete tulemusena selgus, et 24 tundi leotatud ja vaiguga kaetud katsekehade survetugevus oli vähemalt 89% suurem kui katmata katsekehadel ning 48 tundi leotatud katsekehadel vähemalt 150% suurem.</p>			
Märksõnad: epoksiidvaik, tugevdamine, okaspuit, paindetugevus, ristikiudu survetugevus.			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Senni Vels		Specialty: Civil Engineering	
Title: Influence of epoxy resin to physico-mechanical properties of softwood			
Pages: 77	Figures: 26	Tables: 16	Appendixes: 20
Department:		Department of Rural Building	
Field of research and (CERC S) code:		Civil engineering, T220	
Supervisor:		Marko Teder	
Place and date:		Tartu 2018	
<p>In this thesis the physico-mechanical properties of softwood treated with epoxy resin were studied. In laboratory tests, the flexural strength of the reinforced wood of the epoxy resin and the wood compressive strength perpendicular to grain of the specimens coated with resin were evaluated. In addition, the moisture content of the test pieces after soaking and drying cycles was determined.</p> <p>The tests were carried out in accordance with ISO 13061-3:2014, EVS-EN 317:2000 and ISO 3132. The woody material of the test pieces were spruce and pine, which are the main types of wood used for building material.</p> <p>The three-point bending tests were performed so that the cut weakening groove remained in the strain zone. Making a groove for the spruce weakened the bending strength by 42%, but in the case of pine, the groove did not significantly weaken the wood. The test pieces of spruce filled with epoxy resin and the test pieces without cut groove and epoxy resin matched with the results of the flexural strength test. In the case of pine, the flexural strengths of all test pieces were quite similar, so a similar conclusion can not be drawn.</p> <p>To measure the moisture content of the test pieces, up to two 24-hour soaking and drying cycles were performed on the test pieces. The moisture content of the epoxy-resin-coated test pieces were three to five times smaller than the uncovered test pieces. Based on the results, it is assumed that resin coating helps prevent woody material from moistening.</p> <p>In the compression tests perpendicular to grain, the same test pieces that had passed the soaking and drying cycles were used to prove how much environmental conditions would undermine the compressive strength of the wood. As a result of wood compressive strength perpendicular to grain tests, it was found that the 24-hour soaked and resin-coated test pieces had a compressive strength of at least 89% higher than uncovered test pieces and 48-hour soaked and resin-coated test pieces had a compressive strength at least 150% higher than uncovered test pieces.</p>			
Keywords: epoxy resin, reinforcement, softwood, flexural strength, compression strength perpendicular to grain			

Sisukord

Sisukord.....	4
SISSEJUHATUS.....	6
1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE	8
1.1 Epoksiidvaigust üldiselt.....	8
1.1.1 Ettevaatusabinõud epoksiidvaigu kasutamisel ning mõju tervisele	10
1.1.2 Epoksiidvaigu utiliseerimine, mõju keskkonnale.....	12
1.1.3 Epoksiidvaigu kasutamine puidutööstuses	13
1.2 Eestis laialdaselt kasutatavad puidu liigid	15
1.3 Puidu vead ja kahjustused	16
2 UURIMISMATERJAL JA METOODIKA	17
2.1 Kolme punkti paindekatsed.....	17
2.1.1 Uurimismaterjali kirjeldus	17
2.1.2 Katsete tegemiseks vajalikud seadmed ja vahendid	19
2.1.3 Katse käik	21
2.2 Survekatsed ristikiudu.....	23
2.2.1 Uurimismaterjali kirjeldus	23
2.2.2 Katse tegemiseks vajalikud seadmed ja vahendid	24
2.2.3 Katse käik	26
2.2.4 Ristikiudu survetugevuse leidmine.....	28
2.2.5 Andmetöötlus	29
3 KATSETE TULEMUSED JA ANALÜÜS	30
3.1 Paindekatsete tulemused ja analüüs	30
3.2 Niiskussisalduse määramine ja analüüs	34
3.3 Ristikiudu survekatsete tulemused ja analüüs	40
KOKKUVÕTE	46
KASUTATUD KIRJANDUS	48
LISAD	50
Lisa 1. Paindekatse kuuse katsekehade mõõtmed ja kaalud	51
Lisa 2. Paindekatse männi katsekehade mõõtmed ja kaalud	52
Lisa 3. Kuuse paindekatsete tulemused	53
Lisa 4. Kuuse paindekatse ühepoolse ANOVA testi tulemused.....	54
Lisa 5. Kuuse paindekatse post-hoc Tukey testi tulemused	54
Lisa 6. Männi paindekatsete tulemused	55

Lisa 7. Männi paindekatse ühepoolse ANOVA testi tulemused	56
Lisa 8. Survekatsete kuuse katsekehade mõõtmised ja kaalud.....	57
Lisa 9. Survekatse männi katsekehade mõõtmised ja kaalud	62
Lisa 10. Kuuse katsekehade survekatsete tulemused.....	66
Lisa 11. Männi katsekehade survekatsete tulemused	68
Lisa 12. Pildid survekatse epoksiidvaiguga kaetud proovikatsekehast peale 3 mm deformatsiooni rakendamist.....	71
Lisa 13. Soonega kuuse katsekehade paindekatse graafik.....	72
Lisa 14. Tervik kuuse katsekehade paindekatsete graafik	72
Lisa 15. Epoksiidvaiguga täidetud kuuse katsekehade paindekatse graafik.....	73
Lisa 16. Soonega männi katsekehade paindekatsete graafik	73
Lisa 17. Tervik männi katsekehade painde graafik	74
Lisa 18. Epoksiidvaiguga täidetud kuuse katsekehade paindekatse graafik.....	74
Lisa 19. Paindekatsele iseloomulikud purunemispildid	75
Lisa 20. Foto survekatsel deformeerunud epoksiidvaiguga kaetud ja katmata katsekehadest	77

SISSEJUHATUS

Puit on üks tuntumaid ja laialdasemalt kasutatavamaid ehitusmaterjale tänu oma tugevusele, lihtsasti töödeldavusele ja kergesti kättesaadavusele. Sellel on materjalina palju eeliseid, aga ka mõningaid puuduseid. Suuremateks puudusteks süttivuse kõrval, saab nimetada seen- ja mardikakahjustuste tekkimise ohtu puidu liigniiskumisel. Põhilised niiskumise põhjused on väärilahendused konstruktsioonides või vähene kaitse, millele küll tänapäeval hooneid projekteerides küllaltki palju tähelepanu pööratakse, aga varasemalt ehitatud puitmajades rohkesti probleeme on tekitanud.

Puitkonstruktsioonide niiskuse eest kaitsmisel tuleb teha nii ennetustööd kui ka olemasolevate kahjustunud konstruktsiooniosade parandamist või väljavahetamist. Paljud vanad väärikad puitmajad on ka muinsuskaitse all, seega võimalikult suur osa originaalist tuleb säilitada. Parandamise meetodeid on mitmeid, kõige enam kasutatavamad on poltühenduste tegemine või proteesimine kas külglappide või diagonaaltapiga, sest need lahendused on kõige kiiremini ja kergemini valmistatavad. Tihti on parandusmeetodite puuduseks see, et parandustöö jääb näha ning see vähendab objekti autentsust. Enamasti on väljavahetatava puidu kahjustumisel ka mingisugune põhjus, mis tihtipeale võib olla seotud niiskuse tekkimisega ning puidust proteesi paigaldamine ei pruugi lahendada probleemi. Oluline on enne parandustööde tegemist likvideerida kahjustuse põhjus.

Üha enam kasutatakse tänapäeval mitme erineva materjali kombineerimise tehnoloogiaid ning seda ka puidutööstuses. Igasugused puidukaitsevahendid, liimid, värvid ja lakid ongi juba keemiliste elementide kooslus, millega puitu töödeldakse. Täielikult naturaalsel puitu niiskes keskkonnas või välitingimustes enam tänapäeval ei kasutata, sest see ei ole piisavalt vastupidav. Üheks näiteks võib tuua puitplastkomposiidi, kus tegemist on 60% puidu ning 40% plastiku ja lisaainetega. See materjal on täielikult taaskasutatav ning viimasel paaril aastal palju populaarsust kogunud just ilmatikukindluse ja kasutusea tõttu. Küllaltki vähe on aga teaduslike katsete abil uuritud plastikuga puidu parandamist renoveerimistööde käigus ja sellega erinevate kahjutuste ennetamist uute konstruktsioonide loomisel või vanade asendamisel. Selliselt oleks võimalik luua omamoodi puitplastkomposiit, mis ei ole küll tehases tervikuna valmistatud, vaid on tööde käigus kohapeal kokku valatud.

Üks laialdasemalt kasutatavaid ja parimate tehniliste näitajatega plastiku tooteid on epoksiidvaik, mida on võimalik kohapeal kahest komponendist kokku segada ning valada vastavalt raketise kujule sobiv plastiku mass. Kuna tegemist on küllaltki viskoosse materjaliga, suudab see tungida piisavalt sügavale puitu, et lukustuda puidu rakkude struktuuri ning see plastiku massiga siduda. Plastikulaadsed materjalid on ka tuntud kui väga niiskuskindlad ja omadustelt tugevad materjalid.

Uurimistöö eesmärgiks on välja selgitada, kas epoksiidvaiguga on võimalik tugevdada puitu ja parandada selle vastupidavust liigniiskumisele. Tugevdamise osas on vaatluse alla võetud puidu painde- ja muljumistugevused

Puitmaterjal, mida uurimistöö katsekehades kasutati, on kuusk ja mänd, mis on kohalikud kõige enam levinud ehituspuidu materjalid. Katsete tegemine jaotati kahte rühma. Kõigepealt teostati paindekatsed väikeste katsekehadega mõõtudega $20 \times 20 \times 300 \text{ mm}^3$, millele oli pikikiudu sisse lõigatud 5 mm laiune ja sügavune soon, mis imiteerib naturaalselt puitu kuivanud pikilõhet. Paindekatsete abil oli võimalik välja selgitada, kas epoksiidvaiguga täidetud soonega katsekehade paindetugevused on tervik katsekehadega võrdväärsed. Eraldi uuritakse niiskussisaldust katsekehadel mõõtmatega $20 \times 20 \times 75 \text{ mm}^3$, kus pooled katsekehadest kaeti õhukese epoksiidvaigu kihiga. Katsekehadega viidi läbi kuni kaks leotamise ja kuivatamise tsüklit, mille tulemusena määrati katsekehade niiskussisaldused. Katsete eesmärgiks oli välja selgitada niiskussisalduse muutused ja uurida, kas epoksiidvaiguga on võimalik parandada puidu muljumistugevust (surve ristikiudu).

Käesolev magistritöö on üles ehitatud kolme osana, kus esmalt tutvustatakse kasutatavaid materjale ja varasemalt teostatud uuringuid. Seejärel kirjeldatakse meetodikat, katseadmeid ja uurimuse praktilist osa. Magistritöö viimases osas esitatakse katsete tulemused ja nende analüüs.

1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

Epoksiidvaigust üldiselt

Epoksiidvaigud avastas aastal 1909 Nikolaus Prileschajew [1].

Laialdasemalt jõudis see kasutusele 1940. aastatel. Teises maailmasõjas kasutati epoksiidvaiku metalli asemel, sest selle kasutamine oli ökonoomsem ning selle materjali muutmine oli kiirem ja odavam kui metalli sulamite. Tegemist on stabiilse, heade mehaaniliste omaduste ja mahuliselt väikese kahanemisega ainega, millega oli hea vajalikke objekte suurtes kogustes vormide järgi toota [2].

Terminit „vaik“ (inglise k. *resin*) kasutatakse kirjeldamiseks pigem füüsikaliste kui keemiliste omadustega ainet. Vaikudel ei ole kindlat kristallilist struktuuri, materjal puruneb klaasi sarnaselt ja sellel puudub kindel sulamistemperatuur. Pigem võiks vaiku kirjeldada struktuurilt kummise materjalina, nii nagu enamik polümeere [3].

Epoksiidvaigud kuuluvad sünteetiliste vaikude gruppi, kus tooted varieeruvad viskoossete vedela koostisega kuni kõrge sulamistemperatuuriga tahkete ainete vahel. Vaigu molekul sisaldab ühte või rohkemat epoksiidi gruppi, mis enamasti on glütsidüülide kujul ning sisaldavad ka hüdroksüülide rühma. Kõige olulisem osa vaigust on aga bisfenooli A glütsidüüleeter, mis on saadud epikloorhüdriini (ECH) ja difenüülpropaani (DPP), tuntud ka kui bisfenool A (BPA), kondenseerumisest [4]. Epoksiidvaik koosneb vedelast vaigu komponendist ja kõvendi komponendist, mis kokkusegamisel moodustavad keemiliselt omavahel ristunud sidemetega ühendi, mis on peamiselt läbipaistev või kergelt kollaka varjundiga. Tavaliselt on komponentide kokkusegamise suhe neli ühikut epoksiidi ja üks ühik kõvendit, kuid see sõltub epoksiidis kasutatud keemilisest ühendistest ning seega võib ainete omavaheline suhe varieeruda. Epoksiidvaigu koostis on selle kasutamise aja jooksul muutuv. Kohe peale segunemist on tegemist küllaltki vedela õlilaadse koostisega, kuid kasutusaja lõppedes on see juba meesarnase paksema koostisega. Pärast komponentide kokkusegamist on enamike epoksiidvaikude kasutusajaks 15 -30 minutit toatemperatuuril, mille jooksul tuleks segatud vaik ära kasutada, vastasel juhul hakkab see tahenema. Suurem

osa epoksiidvaike kuivab oma lõplike omaduste saavutamiseks vähem kui 7 päeva, kuid 80% oma tugevusest saavutab juba esimese 48 tunni jooksul [5].

Epoksiidid on termoreaktiivsed vaigud ehk neil on pöördumatu keemiline reaktsioon, mis tähendab, et temperatuuri muutudes, näiteks kuumenedes, need ei pehmene ega muutu vedelaks. Nad moodustavad ristsidemetega polümeerid, mis on tugevad, niiskuse ja kemikaalide kindlad ning piisavalt jäigad, et pidada vastu suurtele pikaajalistele staatilistele jõududele ilma deformatsioonideta [6].

Tänapäeval leiab epoksiidvaikudele väga laialdasi kasutusvaldkondi. Näiteks kasutatakse seda korrosioonivastase aienena, mida on küllaltki lihtne peale kanda erinevatele materjalidele. Metallpurke ja anumaid kaetakse õhukese epoksiidikihi, et ära hoida roostetamist, eriti kui pakendatakse happelisi toiduaineid. Samuti kasutatakse epoksiidvaiku põrandakatete valmistamisel, näiteks komposiitmaterjal terrazzo või epoksügregaati põrandad, kus mõlemal juhul on vaigu sisse segatud väikeseid kive, marmori, kvartsi, graniidi või klaasi tükke. Epoksiidid kuuluvad ka struktuursete liimide valdkonda, mida kasutatakse lennukite, autode, jalgrataste ja paatide valmistamisel, kus on vaja tugevaid liiteid. Samas on võimalik sellest vormide abil valmistada ka eraldi objekte, millega saab vajadusel asendada metalli, puitu või muid traditsioonilisi materjale. Ühtlasi annab vaigu kasutusega lihtsustada tootmist, hoida kokku kulusid ja kiirendada protsessi. Seda kasutatakse ära valmistades kiududega tugevdatud epoksiidkomposiitmaterjale asendamaks või parandamaks metalli. Kosmose tööstuses kasutatakse tihti klaasi, süsiniku või boori kiududega tugevdatud epoksiidvaiku erinevate tarvikute valmistamiseks, kasutades ära selle madalat maksumust, aga samas tugevaid liimaine omadusi. Ka elektroonikatööstuses kasutatakse epoksiidvaiku, sest tegemist on väga hea elektriisolaatoriga, mis suudab kaitsta tolmu ja niiskuse eest ning ka välitingimustes muutuva temperatuuri ja kiirguse eest [1].

Aja jooksul tekib epoksiidvaigul füüsikaline ja keemiline vananemine. Füüsikaline vananemine on tugevalt mõjutatud juba kõvenemise protsessi temperatuurist ja ajast. Tihtipeale võib temperatuuri tõstmine ainesiseseid osakestevahelisi sidemeid tugevdada, kuid liiga kõrge temperatuur võib vastupidiselt sidemeid nõrgestada, seega ongi erinevatel vaigu toodetel kindel kõvenemise temperatuur. Füüsikalised mõjud vaigu lõplikel omadustel on jäigastumine ja klaasise materjali karenemine, sumbumisvõime vähenemine, pingete ja deformatsioonide vähenemine, löögitugevuse, purunemise ja maksimaalse pikenemise vähenemine. Vastavad näitajad on saadud, kui vaik ei ole isothermilistes tingimustes ning

sellele ei lisandu kõrgendatud mehaanilisi lisapingeid. Keemilise vananemise all mõeldakse päikesekiirgust, atmosfääri oksüdatiivsust, kõrgeid temperatuure ja niiskust. Olles kokkupuutes kõikide keemilise vananemise mõjuteguritega korraga, kahanevad epoksiidi mehaanilised omadused kolme aasta jooksul 10 -20 %. M. Frigione, C. Naddeo ja D. Acierno poolt koostatud uuring väidab, et keemilist vananemist mõjutav päikesekiirgus mõjutab ainult polümeeri pealmist kihti ning omab vähest mõju lõplikele omadustele. Naturaalsetes ilmastikutingimustes olevate katsekehade entalpia ehk protsessi soojusefekt kaob pärast soojades tingimustes hoidmist ning tekib uuesti, kui välised temperatuurid on madalamad [7].

1.1.1 Ettevaatusabinõud epoksiidvaigu kasutamisel ning mõju tervisele

Epoksiidvaigu valmistamisel ja komponentide kokkusegamisel tuleks neid mõistlikult ja ettevaatlikult kasutada, sest tegemist on siiski reaktiivsete ühenditega. Üldiselt sõltub ettevaatusabinõudega arvestamine töö protsessist ja saavutatavast eesmärgist ning töökeskkonnast, kuid sõltumata sellest on vaiguga töötamisel oma põhireeglid. Igal tootjal on oma ohutuseeskirjad, mida kasutamisel tuleks järgida, sest üldiselt on just vaigu bisfenool A- komponendi osakaal tootjatel erinev ning sellest sõltub ka vaigu ohtlikkus. Vastavalt sellele tuleb koolitada ja valida sobiv personal, kellel puuduvad allergiad koostisosade vastu. Põhilised epoksiidvaiguga töötamise riskid tekivad füüsilisel kokkupuutel vaiguga ning tootest imenduvate gaaside sissehingamisel [4].

Dermatiit on kõige enam levinud terviserike, mida on võimalik epoksiidvaiguga töötamisel saada. Tegemist on kroonilise nahapõletikuga, mida on võimalik saada epoksiidiga kokkupuutest, kuid tegemist on pigem ekstreemsema näitega, mis võib tekkida igapäevasel ja pikaajalisel töötamisel vaiguga ning ohutusnõuete eiramisel [4]. Pikaajaline hingamisteede kokkupuude amiiniaurudega võib põhjustada astmahooge, mille sümptomiteks on ninakaudsete hingamisteede kuivus ja vajadus lisa hingetõmmeteks [8].

Ühekordsel kokkupuutel vaiguga võib tekkida nahale sügelus ja ärritus, kuid puhastades vee ja seebiga on võimalik seda leevendada. Sattumisel silma tuleks neid jooksva vee all

loputada vähemalt 10 minutit ning võimalusel pöörduda arsti poole. Kogu töö peab toimuma hästi ventileeritud ruumides ja vajadusel kohaliku väljatõmbeventilatsiooni all [4].

Vaigu komponentide segamisel tuleks kasutada ühekordseid anumaid ja segamisvahendeid ning kui kasutatakse mitmekordselt kasutatavaid vahendeid tuleks need puhastada ja eraldada. Suuremates tootmisasutustes tuleks epoksiidvaigu segamisprotsess võimalikult suures osas mehhaniseerida, et vältida inimeste kokkupuudet. Kui vaik on tootja poolt kinnitatud aja jooksul kuivanud, ei ole materjalil puudutamise või sissehingamisega seotud terviseriske [8].

Epoksiidvaigu kõige ohtlikumaks komponendiks on monomeer bisfenool A (BPA) mille protsendiline osakaal koostisest mõjutab vaigu toksilisust. D. Lithneri, Å. Larssoni ja G. Dave poolt koostatud uurimustöös on ohtlikud plastiku polümeerid jagatud viieks ohu tasemeks, kus hinnatakse ainete ohuklasse 1 -10 000 ning tase viis ohu klassiga 10 000 on kõige ohtlikum. Ohtusid hinnatakse nii inimese tervisele kui ka keskkonnale. Epoksiidvaik kuulub viiendale ohutasemele ning ohuklassi tulemuseks on 4200 -7100 sõltuvalt vaigu koostises oleva bisfenool A sisaldusest ning suurimaks ohuks tervisele on naha ärritus. Võrdluseks saab tuua, et ehituslik polüüretaan (PUR) vaht kuulub viiendasse ohuklassi saades tulemuseks 13 800 ning polüvinüülkloriid (PVC) kuulub samuti viiendasse ohuklassi saades tulemuseks 5000 -10 000 ning mõlemal on suurimaks ohuks tervisele kantserogeensete ainete sisaldus [9].

Töökeskkonna meditsiini instituut (IOM) koostas koostöös maailma terviseorganisatsiooniga uuringu, kus tuuakse välja, et Euroopa Liidus on viisteist riiki, kus toodetakse 1-kloro-2,3-epoksüpropani, millest toodetakse epoksiidvaiku. Selle keemilise ühendiga puutub kokku 44 000 inimest Euroopa Liidus kuigi mõned vaid väga vähesel määral. Praegusel ajal on hinnatud kokkupuude madalaks ja on väga ebatõenäoline, et keegi ületaks kokkupuutel 1,9 mg/m³ taset. Tulevikus nähakse pigem kahanevat trendi, töökeskkonna ja tervise kaitsevahendite arenemisega seega otsest ohtu inimeste tervisele ei nähta [10].

1.1.2 Epoksiidvaigu utiliseerimine, mõju keskkonnale

Epoksiidvaiku toodetakse maailmas 0,8 tonni aastas [9].

Vedelal kujul epoksiidvaik ja mõned reaktiivsed lahustid ei ole kergesti biolagunevad. Kuigi vaigu epoksiidide grupid hüdrolüüsuvad kokkupuutel veega, on neil siiski potentsiaal bioakumuleeruda ning olla mõõdukalt mürgised veeorganismidele. Vastavalt Euroopa Liidu kriteeriumitele klassifitseeritakse epoksiidvaigud üldiselt keskkonnale ohtlikuks. Mõningad vaigu koostisosad sisaldavad lahusteid, mille emissioon õhus peab olema kontrollitud, kuid enamikes riikides on selleks kehtestatud piirangud. Vedelal kujul ei ole vaik bioloogiliselt kättesaadav, ega ka kergesti biolagunev, kuid seda on võimalik hüdrolüüsida. Otsest ohtu keskkonnale vaik ei kujuta ja ei vaja erilisi ettevaatusabinõusid, kuid eeldab tööstuslikul käsitlemisel hea tava järgimist [4].

Vastavalt rahvuslikele normidele tuleb epoksiidvaigu tööstuslikud jäätmed utiliseerida ohtlike jäätmete kategooriasse. Tuld tõkestavad vaigud, mis sisaldavad halogeenitud ühendeid tuleb kategoriseerida eraldi. Kui vaik või selle komponendid juhuslikult keskkonda satuvad, tuleb need isoleerida mineraalsete absorbentidega, et need ei imenduks keskkonda. Vedela vaiguga kaetud tooteid või vaigu ülejääke ei tohiks kraanikausis pesta vaid peaks laskma vaigul kõveneda ja moodustada ristsidemetega ühendid, mis ei ole toksilised ja keskkonnale ohtlikud ja mille võib lihtsasti plastikuna utiliseerida. Halogeenitud materjali sisaldavad kõvenenud tuld tõkestavad vaigud tuleb siiski utiliseerida ohtlike jäätmetena. Epoksiidvaigust tehtud tooteid on võimalik taaskasutada need purustades ning kasutades täiteainena teistes kaupades. Teine võimalus on seda taastuva energia eesmärgil põletada [4].

Põhilised tekkivad keskkonnaprobleemid puudutavad tervishoidu, turvalisust, lendlevat orgaaniliste ühendite heitkoguseid, energia tarbimist ja toksilisust. Kõige suuremaks otseselt keskkonda mõjutavaks teguriks on fossiilsete materjalide kasutamine ning eelkõige toore materjali kaevandamine. Võrreldes polüestervaiguga, mis on teine laialdaselt kasutatud termoreaktiivne vaik, on epoksiidvaigu tootmine keskkonnasõbralikum. Vaigu tugevdamine ja polümeriseerimine (monomeeride ühendamine, et saada polümeere või pikkade monomeeri ahelate moodustamine) vajab suurtes kogustes energiakasutust, mis peamiselt tuleneb kõrgete temperatuuride kasutamisest tootmises. Tabelis 1.1 on välja toodud epoksiidvaigu tootmise keskmine keskkonnamõju [11].

Tabel 1.1 Epoksiidvaigu tootmise keskkonnamõju [12]

Keskkonnamõju tegur	Epoksiidvaik
Energia kasutus (MJ/kg)	140,71
Süsinikdioksiidi emissioon (kg/kg)	5,90
CO emissioon (kg/kg)	2,20
SO _x emissioon (g/kg)	19,00
NO _x emissioon (g/kg)	35,00
Tahkeid osakesi (g/kg)	15,00
Biokeemiline hapniku vajadus vees (mg/kg)	1,20
Keemiline hapnikutarve vees (mg/kg)	51,00
Nitraadid vees (mg/kg)	1,00
Fosfaadid vees (mg/kg)	220,00

Epoksiidvaigu keskkonnamõjude vähendamine on aga paljudele vaigutootjatele suureks eesmärgiks ning näiteks antud uurimustöös kasutatud Entropy Resins epoksiidvaiku toodetakse kindla eesmärgiga vähendada tootmisprotsessis keskkonnale avalduvat jalajälge. Põhiliselt on ettevõtte eesmärgiks vähendada süsiniku kasutamist, mis saavutatakse kasutades puhtaid keemilisi elemente ja keemilist tehnoloogiat, mis kasutab vähem energiat ning toodetakse vähem kahjulikke kõrvalprodukte. Sellise ettevõtte struktuuriga vähendatakse kasvuhoonegaaside emissiooni 33% võrra võrreldes tavaliste petrooliumil põhinevate epoksiidvaikude tootjatega, sest kasutatakse taimede põhist süsinikku. Algmaterjalid, mis vaigu koostise moodustavad, on kaasproduktid või ülejäägid teistest tööstuslikest protsessidest [13].

1.1.3 Epoksiidvaigu kasutamine puidutööstuses

Epoksiidvaik liimainena on olnud kasutuses rohkem kui nelikümmend aastat ning on siiani üks kõige laialdasemalt kasutatavatest liimainetest ehitusliku puidu sidumiseks. Erinevad vaigu tootjad suudavad toote koostist vastavalt vajadusele muuta, seega on olemas tooted näiteks spetsiaalselt pragude täiteks, tugevdavate nihke ja tõmbe omadustega, niiskuse või kindlate kemikaalide vastase toimega [14].

Epoksiidvaik liimainena on mitmekülgne ning on võimeline liimima ka plastikut, klaasi ja metalli puiduga, kuid see vajab kindlat ettevalmistust ning pindade puhastamist (vedelate orgaaniliste lahustitega või leelistega) või töötlemist (liivapaberiga pinna karestamine). Liimaine peab tekitama molekulaarse kontakti puidu lignotselluloosse osaga ning tungima niivõrd sügavale puitu, et mehaaniliselt lukustub puidu rakkude struktuuri. Metalliga plastikut ei ole võimalik immutada, seega neid materjale üldiselt ei ole võimalik vesilahusel põhinevate ainetega liimida. Epoksiidvaik ei ole vesilahusel põhinev liimaine ning seega on see võimeline tekitama sideme metalli/plastiku ja puidu vahel [6]. Kõige laialdasemalt kaustatakse puidu ja metalli liiteid epoksiidvaiguga puitkonstruktsioonide parandamisel kasutades tugevdavaid vardaid või plaate, mis võimaldavad kahjustunud osade asendamist kuid suuremas osas originaal puidu säilitamist [15]. Klaaskiududega tugevdatud polümeerplaadid, mis liimiti epoksiidvaiguga puidu külgedele selliselt, et kiud olid tala keskteljest 45° nurga all, suurendasid puidu jäikust 270% [16]. P. Stumes kasutas oma uurimustöös puidu tugevdamiseks metallvardaid, metallplaate ja klaaskiud kangast, mis liimiti puidu külge epoksiidvaiguga, ning lihtsalt epoksiidvaigu massi. Kohalikust kuusest valmistatud katsekehade mõõtmeks valiti 50 x 100 x 2440 mm³. Katsekehade keskele lõigati 12 mm laiune ja 76 mm sügavune lõhe, et puitu nõrgestada vähemalt 20% ulatuses. Kõik valitud tugevdamise meetodid osutusid kasulikuks, kõige suuremat koormust võtsid vastu epoksiidi massiga täidetud ja metallplaatidega tugevdatud katsekehad. Kõige ökonoomsemaks lahenduseks osutus metallvarrastega tugevdatud katsekehad [17].

Ilmtingimata ei pea kasutama metalli või mõnda muud materjali koos epoksiidvaiguga, et puitu parandada, piisab ka ainult vaigust. M.W. Philips parandas oma uurimistööde käigus ajaloolise väärtusega majas olevat koormust kandvat niiskuskahjustustega puitposti ainult epoksiidvaiguga ning leiab, et üldine trend ajalooliste hoonete taastamisel on säilitamine ja parandamine mitte asendamine. Epoksiidvaiguga immutatud välitingimustes olevat puitu (näiteks postide või sammaste aluseid) on võimalik selliselt säilitada teadmata pikaks ajaks. Epoksiidvaigu kasutamine teeb ka hoonete restaureerimistööd odavamaks, sest ei ole vaja kogu elementi eemaldada ja asendada uuega, vaid augud ja praod on võimalik vaiguga täita [3].

Tavapärased läbipaistvad või kergelt kollakad epoksiidvaigud on ka äärmiselt veekindlad ning moodustavad hea baasi puidu värvidele. Küllaltki vähe on uuritud vastupidavust ultraviolet kiirgusele, kuid kui isegi värvikiht annab puidule arvestatava vastupidavuse saab epoksiidvaigu lisamine värvikihi alla tulemust ainult parandada. Võimalus on ka vaigu sisse

värvipigmente lisada, et saada koheselt toonitud välimus, kuid kasutada ei tohiks pigmenti pulbri kujul, sest see võib segamisel jätta ebaühtlase konsistentsi, pigem piisab juba väga väikesest kogusest vedela pigmendi lisamisest [3].

Epoksiidvaik toimib väga hea niiskuse barjäärina, sest puit kapseldub vaiku ja puidu niiskumise kiirus väheneb tunduvalt. Vaiguga katmine ei muuda puidu mõõtmeid, sest see moodustab väga õhukese kihi puidu pinnal. Vaiguga töötlemine suurendab märgatavalt puidu mehaanilisi omadusi (eriti tugevust) võrreldes töötlemata puiduga. See teeb töödeldud puidu eriti sobilikuks näiteks paadikerede valmistamiseks või vineeri välise kihi katmiseks. Epoksiidvaiku kasutatakse ka pehmenenud või mädanenud puidu osade tugevdamiseks. Puidu täitmine ja seejärel vaigu kõvenemine suudab osaliselt taastada puidu tugevuse ja jäikuse. R. M. Powell kirjeldab oma uurimuses viie erineva ainega puidu töötlemist, mis kõik muudavad puidu omadusi: tugevust, stabiilsust, jäikust, veekindlust. Puitu töödeldi ka epoksiidvaiguga ning veekindlus ja veeauru läbilaskvus suurenesid tunduvalt pärast töötlust. Kasvas ka keemiline püsivus ja vastupidavus biokahjustustele. Survetugevus, kõvadus ja kulumiskindlus suurenes märgatavalt ning väike muutus tekkis ka värvuses [18].

Eestis laialdaselt kasutatavad puidu liigid

Kõige laialdasemalt on Eestis levinud okaspuud, mis hõlmavad puistude pindalast *ca* 60%. Okaspuudest levinuimad on mänd ja kuusk, mida kasutatakse tänu heale kättesaadavusele ja tugevusomadustele tihti ehituspuiduna [19].

Mänd (*Pinus sylvestris*) on Eestis kõige levinum okaspuu, mida võib leida ka kohtades, kus teised puuliigid ei kasva. Männi puitu saab eristada kollakasvalge maltspuidu ja roosaka või pruunikaspunase lülipuidu järgi. Lisaks on märgata rohkelt vaigukäike, mis on koondunud aastarõngaste sügispuiduosasse. Mändide tüved on sihvakad ja sirged ilma erilise koonilisuseta. Puitu võib kirjeldada küllaltki kergesti töödeldavana, kuid siiski tugevana ning suur vaigu sisaldus puidus muudab selle vastupidavaks. Männi puitu kasutatakse nii ehitus- ja mööblimaterjalina kui ka edasiste produktide tootmisel (tehissiid, plastik, kunstnahk, tsellofaan, tärpentiin) [19].

Kuusk (*Picea abies*) on veidi vähem Eestis levinud kui mänd, kuid kuulub kolme tähtsaima metsapuu hulka. Puit on valge, kergelt kollaka või roosaka varjundiga ning aastarõngad on kõigil lõigetel kergesti eristatavad. Kuuse puit on üks pehmemaid, kergesti töödeldav ja oma vaigusisalduse poolest ka kauapüsiv. Liiga kuivades või niisketes tingimustes või öökülmades ei pea kuuse puit vastu ning sellel on ka oluliselt rohkem parasiite, kui näiteks männi puidul. Siiski valmistatakse sellest nii ehituspuitu, mööblit kui ka erinevaid muusikainstrumente [19].

Puidu vead ja kahjustused

Puidu vigadeks nimetatakse nähtuseid, kus puidu tugevus, välimus või struktuur on kahjustunud. Ehituspuidu defektid on tingitud saagimisvigadest, kuivamisest või puitmaterjali enda vigadest. Olulisemad puitmaterjali enda vead on oksakohad ja ebaühtlasel kuivamisel tekkinud välispinna praod, mis asetsevad radiaalselt ristlõikes [20].

Hoiustamine ebasoodsas kliimas on suurim puidu kahjustuste tekkepõhjus. Puit on väga vastuvõtlik erinevatele füüsikalistele teguritele nagu näiteks kuumus, ultraviolet kiirgus, kulumine, tugevad kemikaalid, mis kõik aja jooksul vähendavad puidu tugevust. Tunduvalt rohkem kahjustusi tekitavad aga bioloogilised tegurid, bakterid, putukad ja seenkahjustused, mis kõik ilmnevad kaitsmata puidus ning tekitavad juba lühikese aja jooksul tugevaid kahjustusi. Mikroorganismid, mis puitu hävitavad ja kahjustusi tekitavad ei ründa puitu nii kaua, kuni puidu niiskuse tase jääb alla 20%. Ka igasuguste hallitus ja mädanikseente ohtu ei teki, kui puidu niiskus on alla 20% ning kõige soodsamaks kasvu tingimuseks on 80 - 120% niiskustase puidus. Kui kahjustused puidus on juba esinenud, siis hea ehitustava kohaselt ei tohi sellist puitu kasutada [20].

2 UURIMISMATERJAL JA METOODIKA

Kolme punkti paindekatsed

2.1.1 Uurimismaterjali kirjeldus

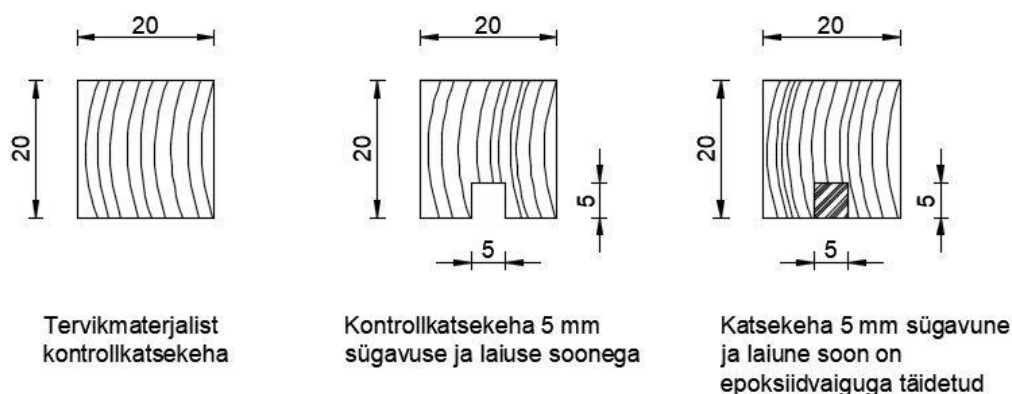
Uurimismaterjaliks valiti kuusest ja männist katsekehad mõõtudega 20 x 20 x 300 mm³ vastavalt standardile ISO 3133 [21]. Katsekehad lõigati selliselt, et aastarõngad asetseksid katsekehade servade suhtes paralleelselt või risti ning kasutati sama puit materjali vältides oksakohti ja vaigupesasid, tagades sellega puitmaterjalile võimalikult ühtlased omadused. Paindekatsed teostati 30 kuuse ja 30 männi katsekehaga, mis jaotusid kolme gruppi. Katsekehade omadused ning grupeering on välja toodud tabelis 2.1 ning mõõtmised koos kirjeldustega joonisel 1.

Tabel 2.1. Katsekehade grupeering ja kirjeldus

Puidu liik	Grupi nr.	Katsekehade arv (tk)	Katsekeha tähis	Katsekeha kirjeldus
Kuusk	I grupp	10	K1-K10	Puidule on sisse lõigatud 5 mm sügavune ja laiune soon, mis on täidetud epoksiidvaiguga.
Kuusk	II grupp	10	K1-K10	Puidule on sisse lõigatud 5 mm sügavune ja laiune soon.
Kuusk	III grupp	10	K1-K10	Tervikmaterjal
Mänd	I grupp	10	M1-M10	Puidule on sisse lõigatud 5 mm sügavune ja laiune soon, mis on täidetud epoksiidvaiguga.
Mänd	II grupp	10	M1-M10	Puidule on sisse lõigatud 5 mm sügavune ja laiune soon.
Mänd	III grupp	10	M1-M10	Tervikmaterjal

Esimese ja teise grupi katsekehadele oli soon lõigatud puidu pikisuunas ning paindekatsel jäi sisselõike osa tõmbekihti. Mõlema puiduliigi teise grupi katsekehadesse (edaspidi

soonega katsekehad) lõigatud soon imiteerib puidu pikilõhet ning esimese grupi katsekehadel oli sisse lõigatud soon epoksiidvaiguga täidetud (edaspidi vaiguga täidetud katsekehad). Kolmanda grupina on toodud tervikmaterjal (edaspidi tervik katsekehad), et oleks referentsväärtus defektita puidu osas.



Joonis 1. Paindekatsel kasutatavate katsekehade mõõtmed ning kirjeldus.

Täitematerjalina kasutati Entropy Resins epoksiidvaiku SUPER SAP® CCR System. Selle tootja epoksiidvaik on valitud tuginedes ökoloogilisele jalajäljele, mõistlikule hinnaklassile ja headele tehnilistele näitajatele. Epoksiidvaigule ei lisatud ühtegi lahustit ega täiteainet ning vaigu valmistamise metoodika tugines tootjapoolsetele juhenditele. Materjali tehnilised andmed on välja toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Kasutatud epoksiidvaigu SUPER SAP CCR System tehnilised näitajad [13]

Tehniline näitaja	Standard	Ühik	Väärtus
Tõmbemoodul	ASTM D638	GPa	3,0
Tõmbetugevus	ASTM D638	MPa	54,5
Pikenemine	ASTM D638	%	6,5
Paindemoodul	ASTM D790	GPa	2,8
Paindetugevus	ASTM D790	MPa	76,5
Survetugevus	ASTM D695)	MPa	74,9
Klaasistumistemperatuur	DSC	°C	39

2.1.2 Katsete tegemiseks vajalikud seadmed ja vahendid

Katsekehade välja lõikamiseks kasutati formaatsaagi Lazzari JUNO 3000i, mille saetee laiuks on 3,2 mm ja saeketta läbimõõduks 300 mm. Kasutatud formaatsaag on esitatud joonisel 2.



Joonis 2. Katsekehade lõikamisel kasutatud formaatsaag Lazzari JUNO 3000i. Autori foto.

Katsekehade mõõtmete määramiseks kasutati digitaalset nihikmõõdikut, mille mõõtevahemik on 0 -150 mm ning mõõtetäpsuseks 0,01 mm (vt. joonis 4). Katsekehade pikkuse mõõtmiseks kasutati metallist joonlauda.

Katsekehade kaalu määramiseks kasutati digitaalset kaalu KERN PLB 1000-2, mis on mõõtetäpsusega 0,01 g ja mõõtevahemikuga 0 -1000 g. Kaal on esitatud joonisel 5.



Joonis 4. Digitaalne nihikmõõdik. Autori foto.



Joonis 5. Digitaalne kaal KERN PLB 1000-2. Autori foto.

Uurimismaterjali paindetugevuse määramiseks kasutati metsatööstuse laboris olevat universaalset puidukatsemasinat INSTRON 3369, millega teostati katsekehadele kolmepunkti paindekatsed. Katseseadme maksimaalne survejõud on 50 kN ning see on katsete teostamiseks seadistatud vastavalt standardile ISO 13061-3:2014. Läbipainde mõõtmiseks kasutati optilist videotensomeetrit INSTRON 2663-281, kus katsekehade küljele märgiti musta markeriga keskkoha tähistuseks punkt, et videotensomeeter mõõdaks läbipainde. Masinaid juhiti läbi arvutiprogrammi, mis automaatselt salvestas katsete tulemused ja esitas ka algse andmetöötluse. Katseseadmed on esitatud joonisel 3.



Joonis 3. Universaalne puidukatseseade INSTRON 3369 ja videotensomeeter INSTRON 2663-281. Autori foto.

Epoksiidvaigu segamisel kasutati lateksi sisaldusega kindaid ning vaigu mass segati 1 dl suurusesse plastikust mõõdunõusse. Kasutatud epoksiidvaigu segamise vahekord oli kaks osa vaiku ja üks osa kõvendit. Vaigu komponendid segati puupulga abil kahe minuti jooksul aeglase liigutustega, et vältida õhumullide tekkimist. Vaik valati katsekehadesse lõigatud soontesse kasutades pipetti. Nimetatud vahendid on näidatud joonisel 6. Katsekehade epoksiidvaiguga täitmise ettevalmistusel kaeti ümberkaudsed pinnad pritsmete vältimiseks küpsetuspaberiga, sest epoksiidvaik ei nakku rasvase pinnaga. Samuti tuli katsekehade külgedele valmistada vaigu voolamist takistavad kõrgendatud ääred, mis tehti küpsetuspaberi ja niiskuskindla majapidamisteibiga. Näide kuivamisjärgus katsekehast joonisel 7.



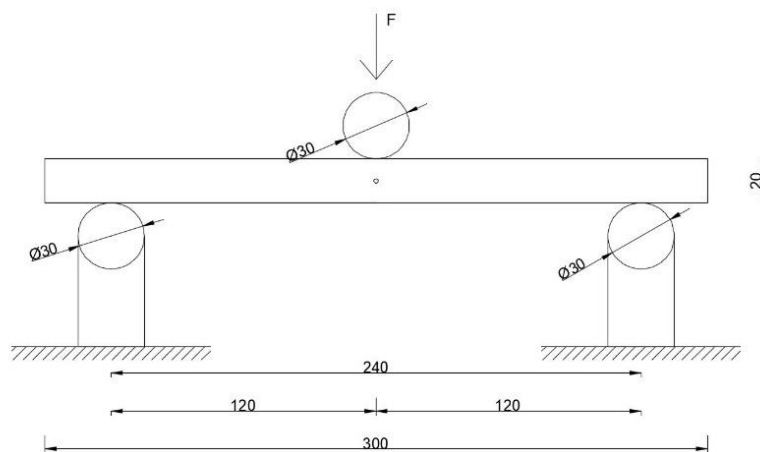
Joonis 6. Abivahendid epoksiidvaigu segamisel ja katsekehade ettevalmistamisel. Autori foto.



Joonis 7. Kuivamisjärgus katsekeha. Autori foto.

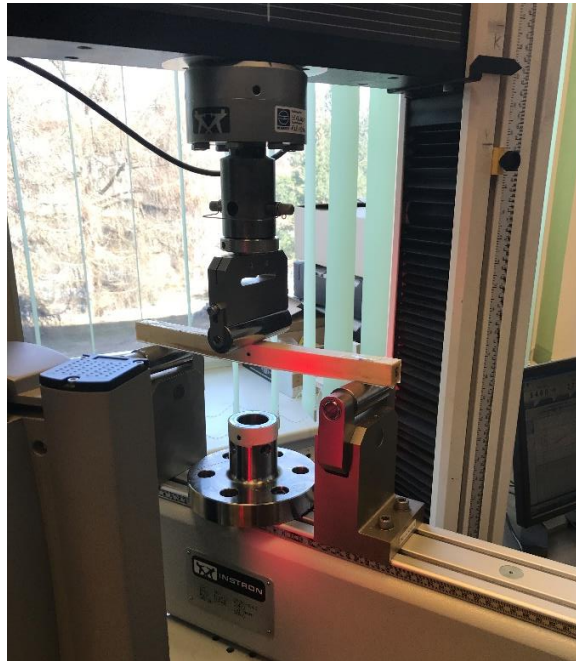
2.1.3 Katse käik

Kolme punkti paindekatsete eesmärgiks oli saada tulemused katsekehade paindetugevusele, deformatsioonile ja elastsusmoodulile. Katsed teostati vastavalt ISO 3133:1975 rahvusvahelisele standardile kasutades universaalset puidukatsemasinat INSTRON 3369 [21]. Kõik katsekehad mõõdeti ja kaaluti enne paindekatse teostamist ning külgedele märgiti markeriga katsekeha keskpunkt, et arvestada läbipainet. Tulenevalt standardist valiti seadmel tugede vahekauguseks 12 katsekeha kõrgust ehk 240 mm ning tugede ja survepea kaare raadiuseks 30 mm. Kolme punkti paindekatse skeem on esitatud joonisel 8.



Joonis 8. Kolme punkti paindekatse skeem.

Katse tulemused arvutas arvuti tarkvara automaatselt ning esitas paindetugevuse, läbipainde ja elastsusmooduli. Maksimaalne koormus saavutati keskmiselt 1,5 minuti jooksul rakendades koormust ühtlasel kiirusel. Näide kolme punkti painde katsest katsekehaga M3 on esitatud joonisel 9.



Joonis 9. Näide kolmepunkti painde katsest katsekehaga M3. Autori foto.

Katsekehad jagunesid puidu liikide järgi kahte gruppi ning need omakorda kolme gruppi, mis tegi kokku 60 katsekeha (vt. tabel 2.1). Kuna katsekehad olid enne paindekatse algust olnud labori keskkonna tingimuses nädala-aega ning vaiguga töödeldud puidu niiskussisaldust on keeruline määrata, siis iga katsekeha niiskussisaldust eraldi ei mõõdetud. Enne vaiguga katmist ja paindekatsete teostamist hoiti katsekehi labori tingimustes temperatuuril 23°C ja õhuniiskusel 20%.

Survekatsed ristikiudu

2.1.4 Uurimismaterjali kirjeldus

Uurimismaterjaliks on valitud kuusest ja männist katsekehad mõõtudega 20 x 20 x 75 mm³ vastavalt standardile ISO 3132 [22]. Katsekehad lõigati samast materjalist vältides oksakohti ning vaigupesasid, et tagada puitmaterjalile võimalikult ühtlased omadused. Survekatsed teostati 50 kuuse ja 50 männi katsekehaga, mis jaotusid kolme gruppi ja need omakorda kahte alagruppi. Katsekehade omadused ning grupeering on välja toodud tabelis 2.3.

Tabel 2.3. Survekatse katsekehade liigitus ja kirjeldus.

Puidu liik	Grupi nr.	Liigitus	Katsekehade arv (tk)	Katsekeha tähis	Katse käik
Kuusk	I grupp	Vaiguga kaetud	10	K1...K10	Katsekehad on leotatud 24 h, kuivavad, konditsioneeritud
		Katmata kontrollkatsekeha	10	K11...K20	Katsekehad on leotatud 24 h, kuivavad, konditsioneeritud
Kuusk	II grupp	Vaiguga kaetud	10	K21...K30	Katsekehad on leotatud 48 h, kaks korda kuivavad, konditsioneeritud
		Katmata kontrollkatsekeha	10	K31...K40	Katsekehad on leotatud 48 h, kaks korda kuivavad, konditsioneeritud
Kuusk	III grupp	Vaiguga kaetud	5	K41...K45	Katsekehad on leotamata, konditsioneeritud
		Katmata kontrollkatsekeha	5	K46...K50	Katsekehad on leotamata, konditsioneeritud
Mänd	I grupp	Vaiguga kaetud	10	K1...K10	Katsekehad on leotatud 24 h, kuivavad, konditsioneeritud
		Katmata kontrollkatsekeha	10	K11...K20	Katsekehad on leotatud 24 h, kuivavad, konditsioneeritud
Mänd	II grupp	Vaiguga kaetud	10	K21...K30	Katsekehad on leotatud 48 h, kaks korda kuivavad, konditsioneeritud
		Katmata kontrollkatsekeha	10	K31...K40	Katsekehad on leotatud 48 h, kaks korda kuivavad, konditsioneeritud
Mänd	III grupp	Vaiguga kaetud	5	K41...K45	Katsekehad on leotamata, konditsioneeritud
		Katmata kontrollkatsekeha	5	K46...K50	Katsekehad on leotamata, konditsioneeritud

Iga grupi pooled katsekehad on kaetud epoksiidvaigu kihiga. Valitud vaik on sama, mis paindekatsel, Entropy Resins SUPER SAP® CCR System, mille tehnilised andmed on eelnevalt välja toodud tabelis 2.2.

2.1.5 Katse tegemiseks vajalikud seadmed ja vahendid

Katsekehade lõikamiseks, mõõtmete määramiseks ja kaalumiseks kasutati samu seadmeid ja vahendeid, mis eelnevalt kirjeldatud paindekatsel peatükis 2.1.2.

Katsekehade vaiguga katmiseks kasutati kile ja küpsetuspaberiga kaetud anumad, et takistada vaigu sattumist tööpindadele ning küpsetuspaberiga kaetud puidust pulki, et katsekehad pinnast kõrgemale tõsta, tänu millele sai vaiguga katta ka alumise katsekeha klotsi pinna. Nimetatud vahendid on esitatud joonisel 10.



Joonis 10. Survekatsete katsekehade katmine epoksiidvaiguga. Autori foto.

Katsekehade leotamiseks kasutati 40- liitrist vanni, kuhu valati vett nii palju, et kõik katsekehad oleksid vee all. Vanni pandi ka metallvõrk raskustega, et katsekehad vee pinnale ei tõuseks. Kirjeldatud vahendid on esitatud joonisel 11.



Joonis 11. Surve katse katsekehade leotamine. Autori foto.

Katsekehade kuivatamiseks kasutati kuivatuskappi Memmert ULE 500, mille maksimaalne võimsus on 2000 W, maksimaalne temperatuur 220°C ja maht 108 l. Kuivatuskapil on automaatne temperatuuri reguleerimise süsteem ja digitaalne termomeeter. Katsekehad kuivatuskapis on esitatud joonisel 12.

Katsekehade konditsioneerimiseks kasutati kliimakambrit Memmert CTC 256, mille maksimaalne võimsus on 7000 W, minimaalne temperatuur -42°C ja maksimaalne temperatuur 190°C, maht 256 l. Konditsioneerimise seade on esitatud joonisel 13.



Joonis 12. Katsekehad kuivatuskapis Memmert ULE 500. Autori foto.



Joonis 13. Konditsioneerimisseade Memmert CTC256. Autori foto.

Uurimismaterjali survetugevuse määramiseks kasutati samuti metsatööstuse laboris olevat universaalset puidukatsemasinat INSTRON 3369, millega teostati katsekehadele ristikiudu survekatseid. Universaalne puidukatse seade on esitatud joonisel 3.

2.1.6 Katse käik

Ristikiudu survekatsete teostamise eesmärgiks oli välja selgitada kahe erineva puidu liigi kolme erineva grupi katsekehade survetugevus. Enne katsete algust katsekehad märgistati, mõõdeti ja kaaluti. I grupi katsekehad ligunesid 40- liitrisel vannis, mis oli täidetud $20 \pm 1^\circ\text{C}$ veega, 24 tundi. Iga katsekeha mõõdeti ja kaaluti ligunemise tsükli lõppedes enne kuivatuskappi panemist. Seejärel paigutati katsekehad kuivatuskappi temperatuurile $103 \pm 2^\circ\text{C}$ nii kauaks, kuni kuue tunni jooksul tehtud kaalumiste erinevus ei olnud rohkem kui 0,1% uurimismaterjali massist. Katsekehad mõõdeti ja kaaluti pärast kuivatamist ning selliselt selgitati välja katsekehade püsivmass, mida saab väljendada protsentuaalselt kuivamisjärgse massi kadumisest sõltuvalt. Kasutades absoluutse niiskuse valemit (1) tulenevalt standardist EVS-EN 322:2002, arvutati välja katsekehade niiskus H (%) [23].

$$H = \frac{m_H - m_0}{m_0} 100, \quad (1)$$

kus

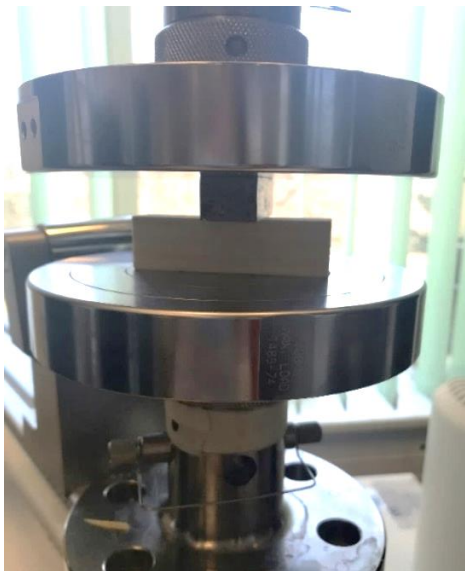
m_H on esialgne puidu mass

m_0 on puidu mass peale kuivatamist

Enne survekatsete teostamist konditsioneeriti katsekehad püsiva massini õhu keskmisel suhtelisel niiskusel, mis on $65 \pm 5\%$ ja temperatuuril $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Püsiv mass loetakse saavutatuks, kui kahe järjestiku 24- tunnise intervalliga teostatud kaalumise tulemused ei erine üksteisest 0,1% võrra katsekeha massist. Esmalt läbisid II grupi katsekehad 24 tunnise leotamise ja kuivatus tsükli. Seejärel sama tsükli korrati ning lõpuks konditsioneeriti katsekehad püsiva massini. Pärast igat leotamist ja kuivatust mõõdeti ja kaaluti katsekehad. Kuivamis- ja ligunemise tsükli teostamise aluseks on võetud standardid EVS-EN 317:2000 ja EVS-EN 322:2002 [23,24]. III grupi katsekehad olid leotamata ning neid ainult konditsioneeriti, et katsete teostamisel oleks kõikidel katsekehadel samad tingimused.

Survekatsed teostati universaalse puidukatsemasinaga INSTRON 3369, mis salvestas arvutisse jõu ja deformatsiooni näitajad iga 0,05 sekundi tagant. Katsekehasid suruti terasprismaga kuni saavutati 1,5 mm deformatsioon. Suurema deformatsiooni saavutamine ei olnud otstarbekas, sest katsekeha purunes. Näide survekatse proovikatsekehast, kus saavutati 3 mm deformatsioon on esitatud lisas 12.

Terasprisma survepind oli 20 mm laiune ning katsekeha alune pind oli täielikult toetatud. Survekatse on näidatud joonisel 14. Katsekehadele märgiti peale keskpunkt ning sellest ühele poole 10 mm kaugusele märgistusjoon selleks, et terasprisma oleks kõikidel katsekehadel paigutatud samale asukohale. Näidis terasprisma paigutusjoonest ja muljunud katsekehast on esitatud joonisel 15. Katsed teostati kokku 50 kuuse ja 50 männi katsekehaga vastavalt standardile ISO 3132 ja GOST 6483.



Joonis 14. Ristikiudu survekatse seadmega INSTRON 3369. Autori foto.



Joonis 15. Märgistused kuhu terasprisma survekatsel paigutada. Autori foto.

2.1.7 Ristikiudu survetugevuse leidmine

Ristikiudu survekatse teostati universaalse puidukatsemasinaga INSTRON 3369 ning saadud tulemuste järgi arvutati igale katsekehale survetugevus ristikiudu vastavalt standardile EVS-EN 408:2010+A1:2012, kasutades valemit 2, kus $f_{90,max}$ leitakse vastavalt graafikule (Joonis 16) ning arvutatakse 1% täpsusega [25].

$$f_{c,90} = \frac{f_{c,90,max}}{b \cdot l}, \quad (2)$$

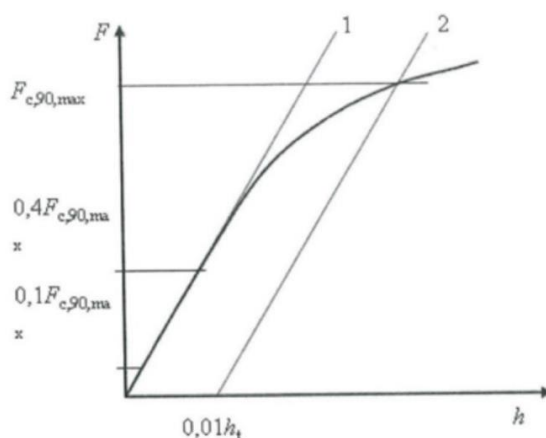
kus

$f_{c,90}$ – survetugevus ristikiudu N/mm^2 ;

$f_{c,90,max}$ – maksimaalne jõud N;

b – katsekeha laius mm;

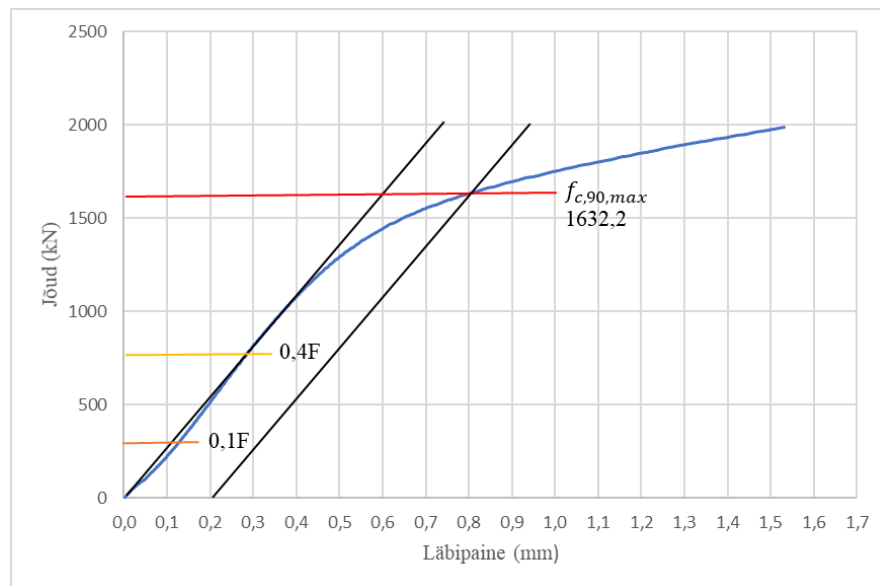
l – katsekeha pikkus mm.



Joonis 16. Koormuse läbipaindegraafik ristikiudu survekatse korral, mille järgi leitakse maksimaalne surve mõjuv jõud, vastavalt standardile EVS-EN 408:2010+A1:2012.

Katse tulemuste algandmete põhjal koostatakse koormuse läbipainde graafik ning lähtudes joonisest 16 ja vastavast standardist, lisatakse punktidele $0,1F$ ja $0,4F$ vertikaalne sirge, millele tõmmatakse paralleelne sirge $0,01$ katsekeha kõrgusmõõdu kaugusele. Punktis, kus paralleelne sirge lõikub läbipainde kõveraga, on sooritatud katse $f_{90,max}$, mida saab kasutada survetugevuse määramiseks valemis 2.

Näide koormuse läbipainde graafikust katsekehaga K21 on toodud joonisel 17, kus näidatud katsekeha maksimaalse jõu $f_{90,max}$ leidmine graafiku alusel. Vastavad graafikud koostati kõikidele ristikiudu survekatse katsekehadele, et leida nende survetugevus.



Joonis 17. Katsekeha K21 koormuse läbipainde graafik mille abil on leitud katsekeha maksimaalne jõud.

2.1.8 Andmetöötlus

Katsete tulemuste lähteandmed saadi katsemasina INSTRON 3369 programmi failidest, kuhu olid katsete tulemused automaatselt salvestatud edasiseks töötamiseks. Surve ja paindekatsed salvestati eraldi failidesse ning katsekehad valiti katsetes kasvavas numbrilises järjekorras, et hiljem oleks lihtsam algtulemusi leida ja edasi töödelda. Kõik edasine andmetöötlus toimus programmis MS Excel 2016, kus kasutati ANOVA ja post-hoc Tukey HSD statistiliste testide p-väärtust, et välja selgitada erinevate katsekeha gruppide tulemuste sarnasused ja erinevused.

3 KATSETE TULEMUSED JA ANALÜÜS

Paindekatsete tulemused ja analüüs

Kuuse esimese grupi moodustasid tervik katsekehad ning teise grupi soonega katsekehad, mille eesmärgiks oli uurida kui palju kahjustused ja lõhed mõjutavad puidu paindetugevust. Katsekehade keskele tõmbetsooni oli nõrgestuseks lõigatud 5 x 5 mm suurune soon (vt. joonis 1.) Kolmanda grupi katsekehade kahjustusena tekitatud soon oli täidetud epoksiidvaiguga ning katse eesmärgiks oli saada küllaltki sarnased paindetugevused võrreldes tervik katsekehadega. Kuuse katsekehade paindekatsete tulemused on esitatud tabelis 3.1. Kõikide katsekehade kaalud ja mõõtmed on esitatud lisades 1 ja 2. Paindekatsete tulemused on esitatud lisades 3 ja 6 ning graafikud on esitatud lisades 13 kuni 18. Lisas 19 on esitatud katsekehade tüüpilisemad purunemispildid. Kuuse paindekatsete statistilised tulemused on esitatud tabelis 3.1.

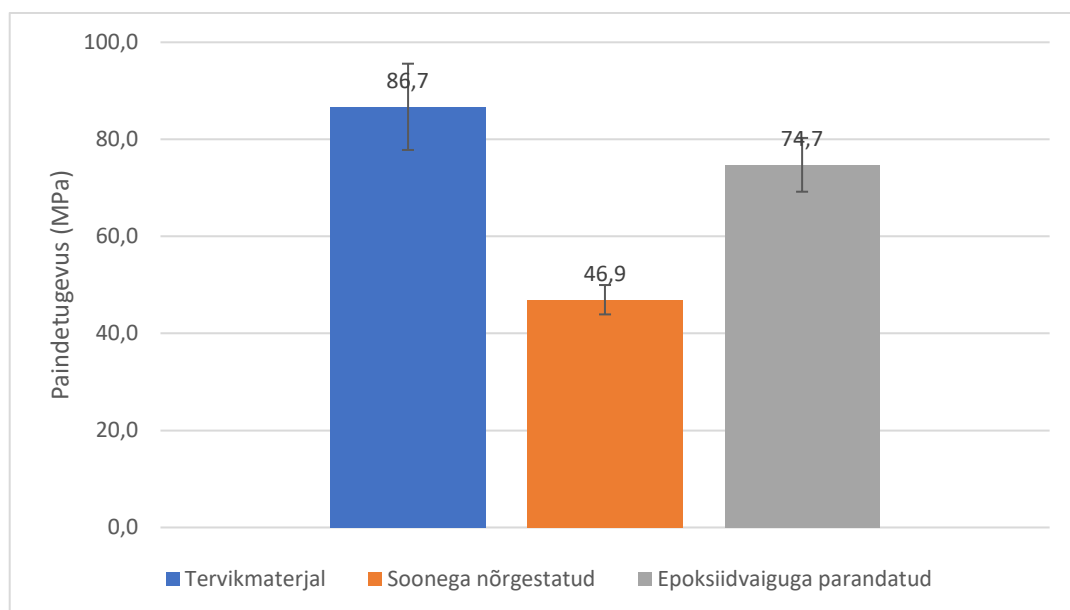
Tabel 3.1 Kuuse paindekatsete tulemused.

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Maksimaalne paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tihedus (kg/m ³)
Tervik katsekehad	keskmine	86,70	10865	469,9
	mediaan	78,74	9872	436,1
	standardhälve	28,11	3022	98,27
	miinimum	55,40	6866	341,7
	maksimum	133,3	15500	605,1
Soonega katsekehad	keskmine	46,94	6723	396,9
	mediaan	46,69	6530	398,1
	standardhälve	9,574	675,6	8,021
	miinimum	34,01	6105	379,3
	maksimum	65,49	8089	406,9
Vaiguga täidetud katsekehad	keskmine	74,74	5921	516,2
	mediaan	70,77	5873	504,0
	standardhälve	17,53	918,3	63,02
	miinimum	52,25	4791	428,4
	maksimum	103,6	7529	598,2

Arvestades kuuse tervikmaterjali ja soonega nõrgestatud materjali katsekehade maksimaalset paindetugevust, saab väita, et soone lõikamisega katsekehadesse nõrgestati

selle paindetugevust keskmiselt 42%. P. Stumes kasutas oma uurimuses sarnast metoodikat lõigates kohaliku kuuse puidu katsekehadesse soone, mis moodustas 18,2% katsekeha mahust ning väitis, et see nõrgestab puitu 20% osas [17]. Antud uurimustöös moodustas soone lõikamine katsekehadesse 6,2% mahust kuid see nõrgestas puitu oluliselt rohkem. Võib järeldada, et erinevused võisid tekkida kasutatava puitmaterjali esialgsest tugevusest ja katsekehade ristlõikest, sest antud töös kasutati väikesemõõtmelisi katsekehasid, varasemas uurimuses aga 50 x 100 x 2400 m³ puittalasid. Samuti võis mõjutada katsete erinevat tulemust ka tekitatud soone ristlõige, sest antud töös oli soone ristlõige 5 x 5 mm, mis on pigem lai, aga mitte nii sügav. P. Stumes kasutas oma uurimuses soone ristlõiget 12 x 75 mm, mis on küllaltki kitsas, aga see-eest sügav. Kuuse puitmaterjali lõhenemine ebaühtlastes tingimustes kuivamisel või mitme kliimatsükli läbimisel nõrgestab puitmaterjali niivõrd olulisel määral, et hea ehitustava kohaselt seda ei saa konstruktsioonides kasutada [20].

Katsete tulemused kõikide gruppide katsekehadel on küllaltki suure varieerumisega, kuid kasutades statistilist andmetöötlust saab välja selgitada, kas varieerumine on tulemustes olulise tähtsusega. Maksimaalse paindetugevuse suurim standardhälve on tervik katsekehadel, mis tähendab, et selle grupi tulemused olid kõige ebastabiilsemad. Seda kinnitab ka kõige suurem erinevus miinimum ja maksimumväärtuste vahel. Keskmised paindetugevused kuuse kolme grupi katsekehadel on toodud tulpdiaagrammil joonisel 18.



Joonis 18. Kuusest katsekehade keskmised paindetugevused.

Kolme grupi paindetugevuste ühepoolse ANOVA testi tulemused näitavad, et p-väärtus on väiksem kui 0,05, mis tähendab, et valitud andmehulgas esines üks või mitu gruppi, mis teistest statistiliselt tulemuste poolest oluliselt erines. Selleks, et välja selgitada, millised grupid üksteisest erinesid, tuli koostada post-hoc Tukey HSD test. Kuuse puidu tervik katsekehade ja vaiguga täidetud katsekehade p-väärtus on suurem kui 0,05, mis tähendab, et tulemuste erinevus on ebaoluline. Oluline erinevus on soonega puitmaterjalil teiste katsekehade gruppidega. Kasutades statistilise analüüsi teste saab järeldada, et epoksiidvaiguga puidu soone täitmine taastab puidu omadused nii, et need pole tervik puitmaterjali algsest statistikast erinevad. Koostatud ANOVA ja post-hoc Tukey testide tulemused on esitatud lisades 4 ja 5.

Võrreldes joonisel 18 toodud keskmiseid maksimaalseid paindetugevusi ning statistilist andmetöötlust võib järeldada, et nõrgestatud kuuse puidu prao epoksiidvaiguga täitmine taastab suures osas puidu esialgse paindetugevuse, sest tulemuste erinevus oli ainult 13,7%. Soonega nõrgestatud kuuse katsekehade epoksiidvaiguga parandamine andis juurde 59,2% paindetugevust.

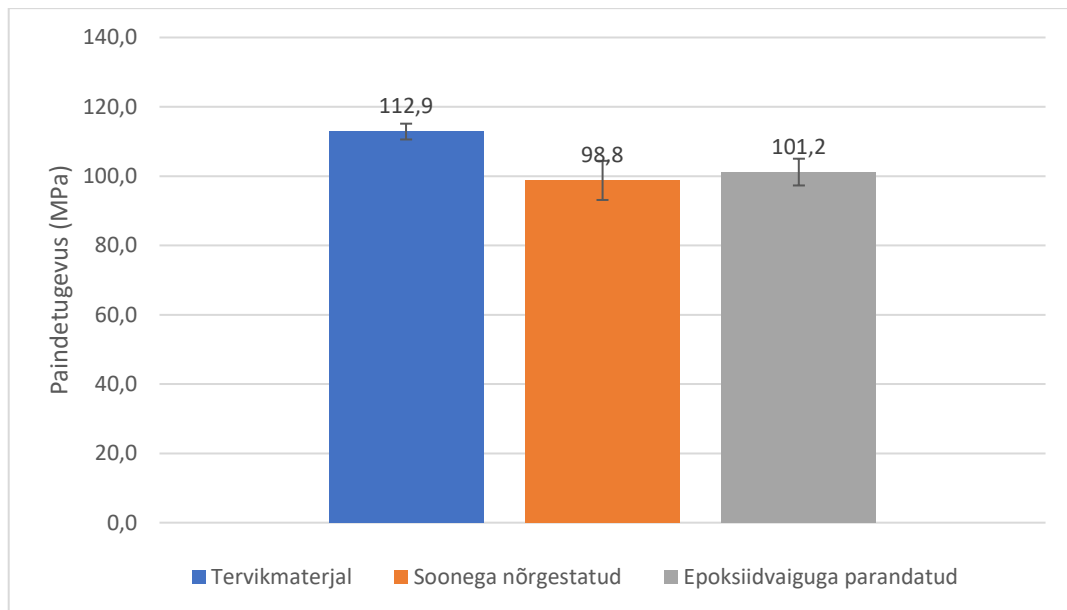
Männi katsekehad jagunesid samuti kolme gruppi ning nendega sooritati samasugused paindekatsed, nagu tehti kuuse katsekehadega. Tabelis 3.2 on toodud männi katsekehade paindetugevused ning võrdluses selgub, et männi puhul ei olnud soone tegemine tervikpuidu sisse olulise tähtsusega. Männi puhul võrreldes tervikmaterjali katsekehadega nõrgestas soone tegemine puitu vaid 11,8%, mis on tunduvalt vähem kui kuuse puidu puhul, mis oli 42,0%.

Tabel 3.2 Männi katsekehade paindekatsete tulemused

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Maksimaalne paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tihedus (kg/m ³)
Tervik katsekehad	keskmine	112,9	14292	629,9
	mediaan	114,6	14453	626,2
	standardhälve	7,206	1129	19,47
	miinimum	100,3	12378	599,7
	maksimum	121,5	15593	676,0
Soonega katsekehad	keskmine	98,76	11762	540,4
	mediaan	102,4	12888	571,8
	standardhälve	17,85	2442	70,65
	miinimum	64,86	6640	408,2
	maksimum	117,1	13686	590,7
Vaiguga täidetud katsekehad	keskmine	101,2	9208	650,5
	mediaan	104,4	8859	675,0
	standardhälve	12,21	1863	57,58
	miinimum	71,15	5795	514,9
	maksimum	112,4	12622	713,3

Kuna männi puidu nõrgestamine ei andnud olulist tulemust, siis ka epoksiidvaiguga puidu parandamine olulist võrdlust ei tekitanud. Paindetugevused olid keskmisest ainult veidi paremad kui soonega nõrgestatud katsekehadel. Kolme grupi keskmiste paindetugevuste võrdlus on esitatud joonisel 19.

Epoksiidvaiguga parandatud männi katsekehade ja tervikkatsekehade omavaheline erinevus oli 10,3%. Tervik katsekehade soonega nõrgestamine mõjutas paindetugevust keskmiselt 11,8%. Soonega katsekehade vaiguga parandamine andis juurde kõigest 2,4%, mis võrreldes kuusega on oluliselt vähem.



Joonis 19. Männist katsekehade keskmised paindetugevused.

Selleks, et välja selgitada katse tulemuste kolme grupi omavaheline seos, tuli kasutada ANOVA statistilise analüüsi testi. ANOVA testi järgi sai kinnitada, et kõik kolm katsekehade gruppi ei erine oma tulemuste poolest, sest p-väärtus on üle 0,05. Katse tulemuste analüüsil selgub, et paindetugevused kõigil kolme grupi katsekehadel on liiga sarnased, et kinnitada hüpoteesi epoksiidvaiguga männi puidu parandamisel. ANOVA testi tulemused on esitatud lisas 7.

Niiskussisalduse määramine ja analüüs

Niiskussisaldust mõõdeti 50 kuuse ja 50 männi katsekehaga. Katsekehade mõõtmed, kaalud ja niiskussisaldused on esitatud lisades 8 ja 9. Mõlema puidu liigi esimese grupi katsekehad jagunesid kaheks- katmata katsekehad ja epoksiidvaiguga kaetud katsekehad, mida leotati vees 24 tundi. Selleks, et välja selgitada, kui palju katsekehad 24 tunni jooksul vett sisse imasid, tuli võrrelda katsekehade kaalu enne ja pärast leotamist. Kuuse katsekehade kaalu muutused on esitatud tabelis 3.3 ja männi katsekehade kaalu muutused tabelis 3.4. Tulemustest selgub, et peale 24- tunnist kuuse katsekehade leotamist on vaiguga katsekehade keskmine kaal suurenenud 3,8% ning katmata katsekehadel 39,5%. Männi epoksiidvaiguga katsekehade kaal on suurenenud 3,15% ja katmata katsekehade kaal on suurenenud 32,1%.

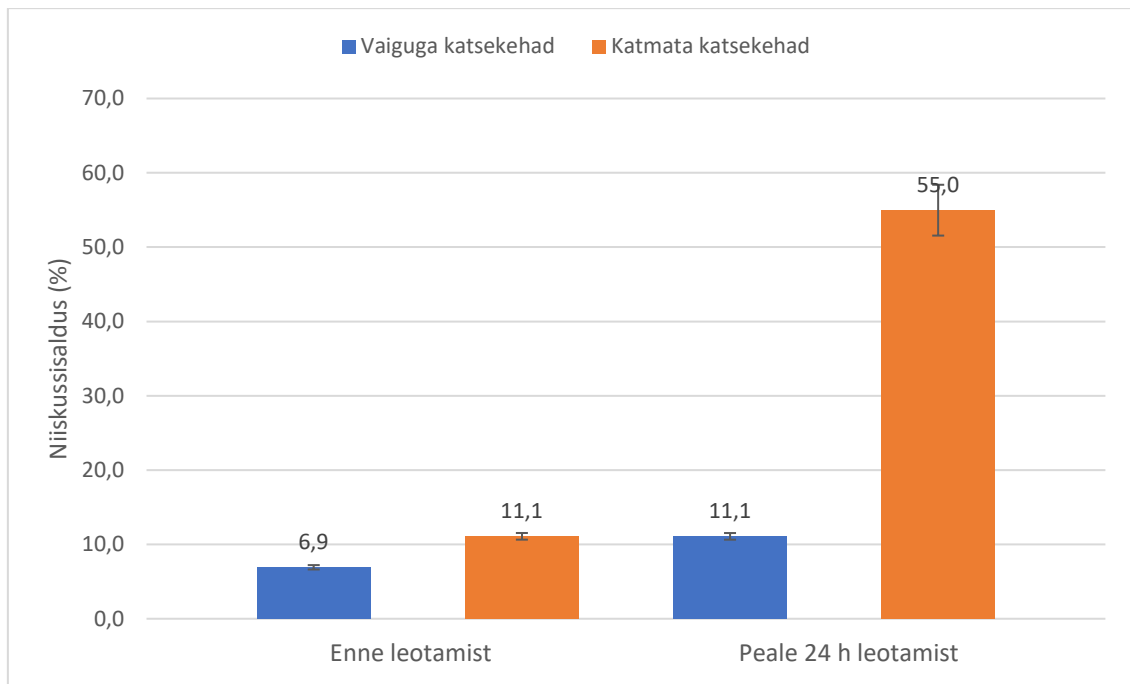
Tabel 3.3 Kuuse katsekehade kaalud enne ja peale 24 tunnist leotamist.

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Kaal enne leotamist (g)	Kaal peale 24 h leotamist (g)	Kaal peale kuivatust (g)
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	keskmine	18,24	18,94	17,06
	mediaan	17,64	18,29	16,51
	standardhälve	2,874	2,905	2,700
	miinimum	14,01	14,39	13,15
	maksimum	22,63	23,15	21,26
Katmata katsekehad	keskmine	11,61	16,20	10,45
	mediaan	11,59	15,87	10,44
	standardhälve	0,323	1,110	0,29
	miinimum	11,13	15,18	10,01
	maksimum	12,14	18,51	10,94

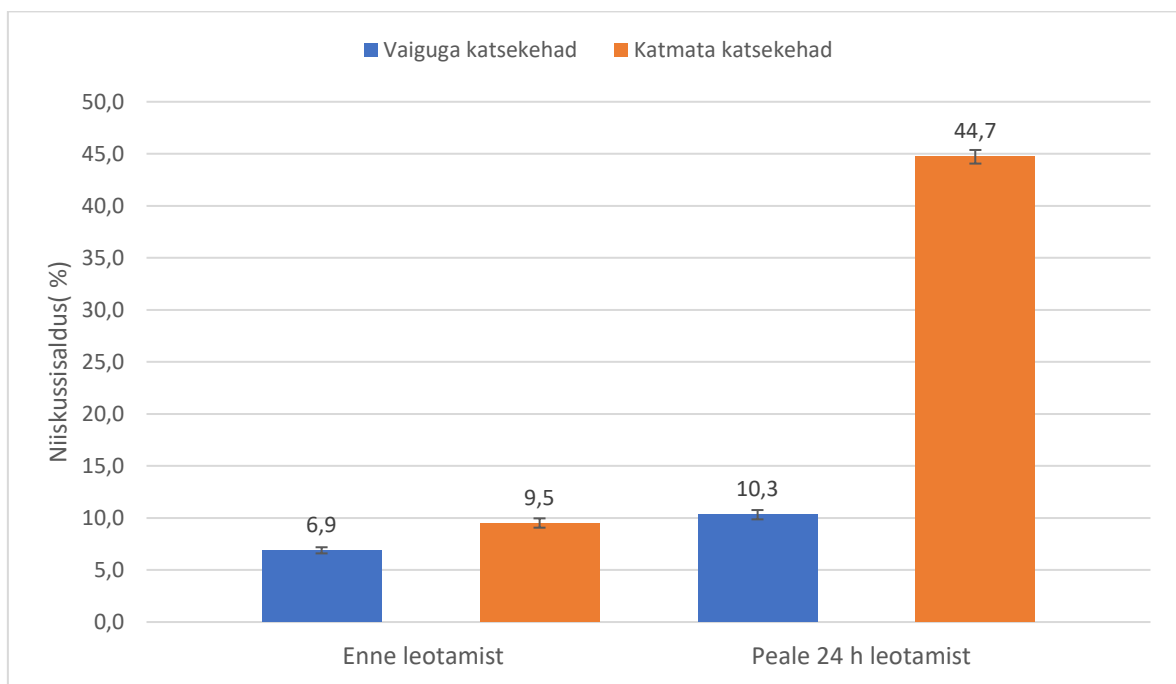
Tabel 3.4 Männi katsekehade kaalud enne ja peale 24 tunnist leotamist

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Kaal enne leotamist (g)	Kaal peale 24 h leotamist (g)	Kaal peale kuivatust (g)
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	keskmine	18,98	19,58	17,76
	mediaan	19,27	19,89	18,08
	standardhälve	2,646	2,661	2,493
	miinimum	15,46	16,03	14,42
	maksimum	22,35	22,70	20,96
Katmata katsekehad	keskmine	17,32	22,89	15,82
	mediaan	17,39	22,79	15,88
	standardhälve	0,275	0,771	0,246
	miinimum	16,82	21,73	15,37
	maksimum	17,68	24,50	16,13

Pärast katsekehade leotamist paigutati need kuivatusahju, et saavutada katsekehade püsiv mass, mida kasutati katsekehade niiskussisalduse arvutamisel vastavalt valemile 1. Kuuse katsekehade keskmised niiskussisaldused on toodud joonisel 20 ja männi keskmised niiskussisaldused joonisel 21.



Joonis 20. Kuuse katsekehade keskmised niiskussisaldused enne ja peale leotamist.



Joonis 21. Männi katsekehade keskmised niiskussisaldused enne ja peale leotamist.

Mõlema puidu liigi niiskussisaldused katmata puidu katsekehadel pärast 24- tunnist leotamist kasvasid kuusel vastavalt 395% ja männil 369%. Epoksiidvaiguga kaetud

katsekehade niiskussisaldused suurenesid oluliselt vähem, kuusel vastavalt 60% ja männil 50%.

II grupi katsekehad läbisid kaks leotamise ja kuivatamise tsüklit. Katsekehad kaaluti, paigutati vette 24 tunniks, seejärel kuivatati temperatuuril $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ kuni kaalumiste erinevus ei olnud rohkem kui 0,1% uurimismaterjali massist. Protsessi korrati ning pärast igat leotamise ja kuivatamise tsüklit katsekehad kaaluti ja mõõdeti. Kuuse katsekehade kaalud enne ja pärast 48- tunnist leotamistsüklit on esitatud tabelis 3.5 ja männi katsekehade kaalud tabelis 3.6.

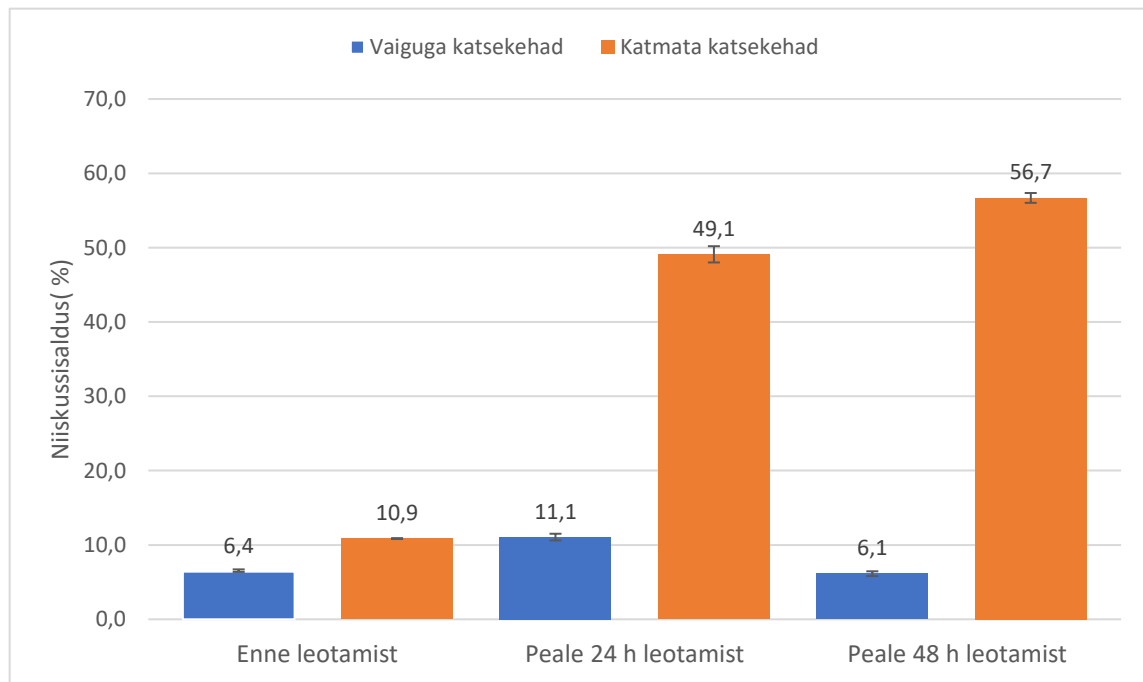
Tabel 3.5 Kuuse katsekehade kaal enne ja peale 24 ja 48 tunnist leotamist.

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Kaal enne leotamist (g)	Kaal peale 24 h leotamist (g)	Kaal peale kuivatust (g)	Kaal peale 48 h leotamist (g)	Kaal peale kuivatust (g)
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	keskmine	17,06	17,80	16,02	17,023	16,039
	mediaan	16,50	17,29	15,37	16,47	15,37
	standardhälve	2,429	2,549	2,193	2,612	2,464
	miinimum	14,40	14,88	13,67	14,13	13,45
	maksimum	20,95	21,94	19,50	20,97	20,07
Katmata katsekehad	keskmine	11,58	15,57	10,44	16,32	10,418
	mediaan	11,43	15,44	10,33	16,20	10,28
	standardhälve	0,713	0,919	0,632	0,876	0,635
	miinimum	10,99	14,63	9,930	15,28	9,880
	maksimum	13,47	17,61	12,12	18,53	12,10

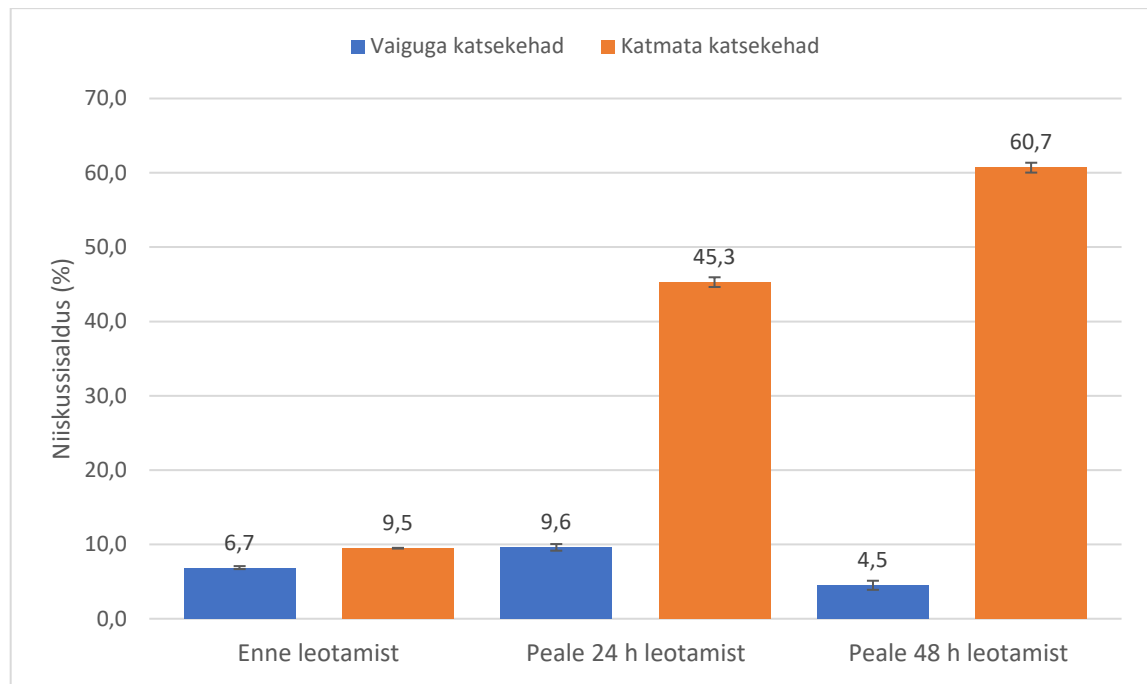
Tabel 3.6 Männi katsekehade kaal enne ja peale 24 ja 48 tunnist leotamist.

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Kaal enne leotamist (g)	Kaal peale 24 h leotamist (g)	Kaal peale kuivatust (g)	Kaal peale 48 h leotamist (g)	Kaal peale kuivatust (g)
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	keskmine	20,52	21,07	19,27	20,112	19,241
	mediaan	21,67	22,25	20,44	21,16	20,32
	standardhälve	3,224	3,287	3,235	3,180	3,029
	miinimum	15,16	15,60	13,49	14,80	14,20
	maksimum	26,12	26,28	25,06	25,23	24,71
Katmata katsekehad	keskmine	17,05	22,62	15,57	24,99	15,546
	mediaan	17,15	22,72	15,65	25,45	15,63
	standardhälve	0,399	0,512	0,362	0,845	0,353
	miinimum	16,09	21,36	14,71	22,99	14,71
	maksimum	17,41	23,20	15,89	25,50	15,88

Kui võrrelda mõlema puidu liigi vaiguga kaetud ja katmata kastekehade keskmist kaalu on selgelt näha, et katmata kastekehade kaal kasvab selliselt, et pärast 48- tunnist leotamist on kastekehad kõige raskemad ehk on imanud kõige enam niiskust. Samas vaiguga kaetud kastekehade kaal püsib suhteliselt muutumatuna ning pärast 48- tunnist leotamist on kastekehad isegi kergemad kui enne leotamist, seega on nad vahepeal kuivades kaalu kaotanud, kuid uuesti leotades vee sisaldus puidus tõusnud ei ole. Pärast viimast leotamist paigutati kastekehad uuesti kuivatusahju ning pärast kaalumist sai arvutada kastekehade niiskussisalduse vastavalt valemile 1. Kuuse kastekehade keskmised niiskussisaldused on toodud joonisel 22 ja männi kastekehade keskmised niiskussisaldused joonisel 23.



Joonis 22. Kuuse kastekehade keskmised niiskussisaldused enne ja peale leotamistsükleid.



Joonis 23. Männi katsekehade keskmised niiskussisaldused enne ja peale leotamistsükleid.

Katsekehade keskmiste niiskussisalduste põhjal selgub, et katmata katsekehad võtavad pärast 24- tunnist leotamist niiskust juurde kuusel vastavalt 350% ja männil 377% ning pärast 48- tunnist leotamist võtavad niiskust juurde eelnevale lisaks kuusel 72% ja männil 161%. Epoksiidvaiguga kaetud katsekehade niiskussisaldus tõuseb pärast 24- tunnist leotamist kuusel 72% ja männil 42% ning pärast 48- tunnist leotamist vaiguga kaetud katsekehade niiskussisaldus kuusel hoopis väheneb võrreldes esialgsesega 5 % ja männil väheneb 33 %.

Ehituspuidu niiskussisaldus on 8...15% ning üle 25% niiskussisaldusega puitu ei tohi konstruktsioonides kasutada [20]. Enne leotamist on epoksiidvaiguga kaetud puidu niiskussisaldus väiksem kui 8%, seega enne vaiguga katmist on puidu niiskussisaldus olnud madalam ning vaiguga katmine on vastava niiskussisalduse talletanud, sest katmata ja kaetud katsekehad on olnud sama kaua samal toatemperatuuril ja õhu niiskusel. Mõlema puidu liigi puhul on katmata katsekehade niiskussisaldused 24- ja 48- tunnise leotamise järel kasvanud selliselt, et niiskussisaldus on tunduvalt üle lubatud piiri, seega välitingimustes kasutatavat puitu on ilmtingimata tarvis ilmastikukindlaks töödelda. Kahe leotamise ja kuivatamise tsükli kokkuvõttes saab öelda, et epoksiidvaiguga puidu katmine takistab puidu hügrokoopset käitumist ning tõenäoliselt on võimalik kolmanda kasutusklassi puitu muuta ilmastikukindlamaks.

Ristikiudu survekatsete tulemused ja analüüs

Vastavalt peatükis 2.2.4 kirjeldatud metoodikale leiti kõikidele katsekehade maksimaalne jõud ja survetugevus. 24 tundi leotatud kuuse katsekehade survetugevused on esitatud kokkuvõtvas tabelis 3.7. Vaiguga kaetud ja katmata kuuse katsekehade survetugevused, mis leotati 48 tundi, on esitatud kokkuvõtvas tabelis 3.8. Vaiguga kaetud ja katmata katsekehade survetugevused, mida ei leotatud, on esitatud tabelis 3.9. Kolme grupi keskmised survetugevused on esitatud joonisel 24. Lisas 10 on esitatud kuuse survekatsete tulemused ja lisa 11 männi survekatsete tulemused. Lisas 20 on esitatud foto survekatsetel deformeerunud epoksiidvaiguga kaetud ja katmata katsekehadest.

Tabel 3.7 Kuuse 24h leotatud katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Survetugevus ristikiudu $f_{c,90}$ (N/mm ²)	Tihedus ρ (kg/mm ³)
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	keskmine	4,243	552,2
	mediaan	4,489	540,3
	standardhälve	1,009	82,5
	miinimum	2,482	420,1
	maksimum	5,674	668,5
Katmata katsekehad	keskmine	1,285	400,8
	mediaan	1,285	400,1
	standardhälve	0,081	10,4
	miinimum	1,150	384,0
	maksimum	1,390	419,6

Tabel 3.8 Kuuse 48h leotatud katsekehade survekatsete tulemused.

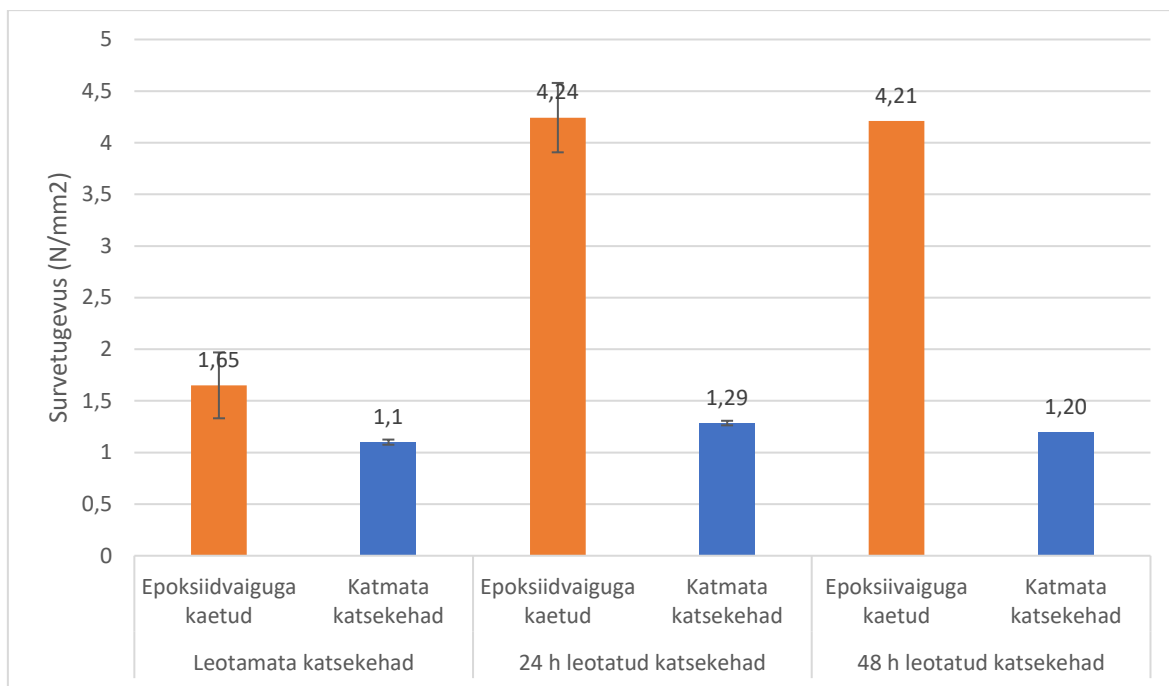
Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Survetugevus ristikiudu $f_{c,90}$ (N/mm ²)	Tihedus ρ (kg/mm ³)
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	keskmine	4,210	538,3
	mediaan	4,054	518,8
	standardhälve	1,065	83,56
	miinimum	3,095	449,5
	maksimum	6,052	667,9
Katmata katsekehad	keskmine	1,198	399,3
	mediaan	1,178	392,2
	standardhälve	0,071	22,76
	miinimum	1,102	382,8
	maksimum	1,290	460,2

Kui võrrelda 24 tundi leotatud vaiguga kaetud ja katmata katsekehi, saab järeldada, et epoksiidvaiguga kaetud katsekehade keskmine survetugevus on 250% suurem katmata katsekehadele. Kahe ja ühe leotamise ja kuivatamise tsükli läbinud katsekehade survetugevused ei ole oluliselt erinevad. Suurim keskmine survetugevuse erinevus oli katmata katsekehal 1,28 N/mm² ja 1,20 N/mm², mis teeb tulemuste erinevuseks 6,2%, kuid ei ole olulise tähtsusega.

Tabel 3.9 Kuuse leotamata katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Survetugevus ristikiudu	Tihedus
		$f_{c,90}$ (N/mm ²)	ρ (kg/mm ³)
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	keskmine	1,650	456,1
	mediaan	1,600	462,5
	standardhälve	0,097	26,5
	miinimum	1,570	415,4
	maksimum	1,760	485,2
Katmata katsekehad	keskmine	1,100	386,7
	mediaan	1,090	385,4
	standardhälve	0,097	26,53
	miinimum	1,570	415,4
	maksimum	1,760	485,2

Võrreldes tabeli 3.9 tulemusi eelnevate katsekehade survetugevustega on näha, et mõlemad tulemused on oluliselt halvemad. Katmata katsekehad, mis on olnud 48 tundi leotamises, on andnud parema survetugevuse, kui leotamata katsekehad. Kolmanda grupi katsekehad valmistati hiljem ja teisest puidu partiist ning need olid enne katsete teostamist erinevas kliimaatilises keskkonnas kui ülejäänud katsekehade grupid. Selgus, et need tegurid mõjutasid oluliselt katse tulemusi ning konditsioneeritud katsekehade tulemused ei olnud teiste gruppidega võrreldes tõsiselt võetavad.



Joonis 24. Kuuse katsekehade kolme grupi keskmised survetugevused.

Epoksiidvaiguga katmine suurendas kuuse katsekehade survetugevust ühel kuivamis ja ligunemistsüklil 350% ja kahel kuivamis ja ligunemistsüklil 351%. Leotamata katsekehadel suurendas epoksiidvaiguga katmine katsekehade survetugevust 150%.

Maksimaalne surveel mõjuv jõud leiti ka männi katsekehadele lähtudes joonisel 16 toodud meetodikast ja survetugevus arvutati lähtudes valemist 2. 24 tundi leotatud epoksiidvaiguga kaetud ja katmata männi katsekehade survetugevused on esitatud kokkuvõttes tabelis 3.10. Vaiguga kaetud ja katmata männi katsekehade survetugevused, mida leotati 48 tundi, on esitatud kokkuvõttes tabelites 3.11. Vaiguga kaetud ja katmata katsekehade survetugevused, mida ei leotatud on esitatud tabelis 3.12. Kolme grupi keskmised survetugevused on esitatud joonisel 25.

Tabel 3.10 Männi 24h leotatud kaetud katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Survetugevus ristikiudu $f_{c,90}$ (N/mm ²)	Tihedus ρ (kg/mm ³)
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	keskmine	4,501	565,0
	mediaan	4,495	567,3
	standardhälve	1,083	83,2
	miinimum	2,871	453,5
	maksimum	6,077	671,8
Katmata katsekehad	keskmine	2,373	543,8
	mediaan	2,415	543,3
	standardhälve	0,306	9,4
	miinimum	1,753	526,2
	maksimum	2,802	555,5

Tabel 3.11 Männi 48h leotatud katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Survetugevus ristikiudu $f_{c,90}$ (N/mm ²)	Tihedus ρ (kg/mm ³)
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	keskmine	5,059	577,5
	mediaan	4,553	611,3
	standardhälve	1,071	79,90
	miinimum	3,902	447,5
	maksimum	6,860	656,0
Katmata katsekehad	keskmine	2,013	526,8
	mediaan	1,986	528,2
	standardhälve	0,262	12,79
	miinimum	1,515	497,2
	maksimum	2,449	541,1

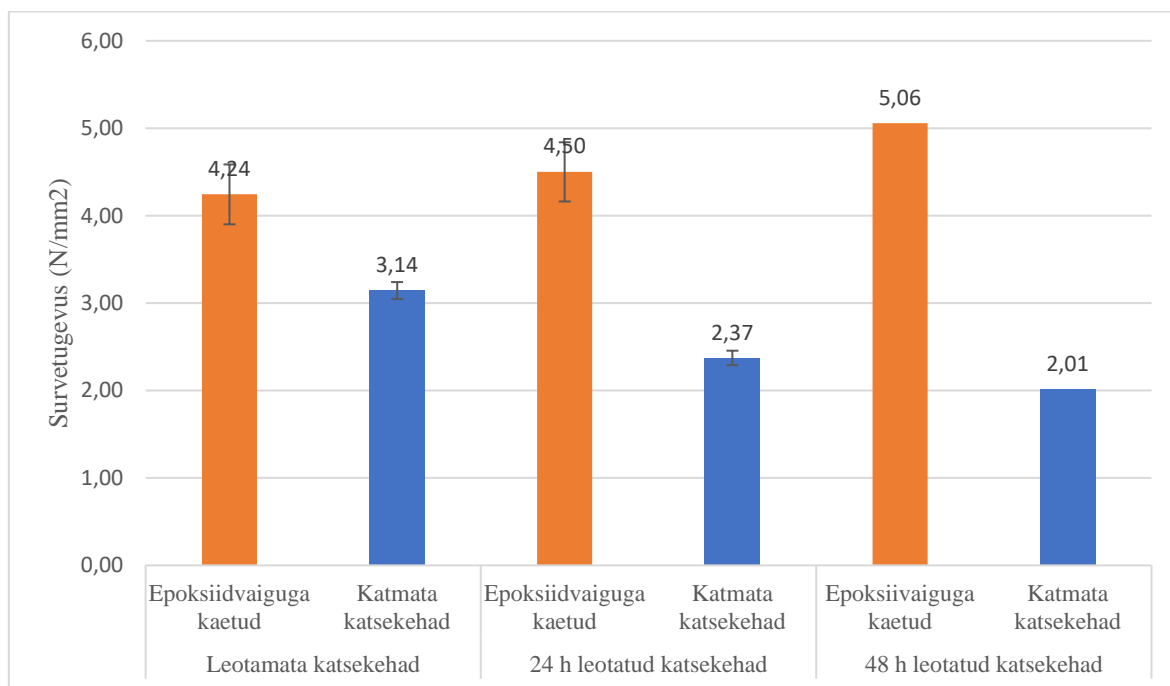
Epoksiidvaiguga katmine suurendas männi katsekehade survetugevust ühel kuivamis ja ligunemistsüklil 89% ja kahel kuivamis ja ligunemistsüklil 151%. Männi ja kuuse epoksiidvaiguga kaetud katsekehade survetugevuste erinevus oli vaid 6%.

Kaks ligunemise ja kuivamise tsüklit läbinud katmata katsekehade survetugevus vähenes võrreldes ühe tsükli läbinud männi katsekehadega 15% kuid epoksiidvaiguga kaetud katsekehade survetugevus peale kahe tsükli läbimist hoopiski suurenes 12%.

Tabel 3.12 Männi leotamata katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekehade liigitus	Statistilised näitajad	Survetugevus ristikiudu $f_{c,90}$ (N/mm ²)	Tihedus ρ (kg/mm ³)
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	keskmine	4,244	651,4
	mediaan	4,262	658,0
	standardhälve	0,856	88,72
	miinimum	2,862	520,6
	maksimum	5,058	762,7
Katmata katsekehad	keskmine	3,144	602,5
	mediaan	3,593	600,4
	standardhälve	0,779	10,92
	miinimum	2,008	590,8
	maksimum	3,809	616,2

Männi leotamata katmata katsekehade keskmine survetugevus on vähemalt 32 % suurem nendest, mis läbisid ühe või kaks ligunemise ja kuivamise tsüklit, mis näitab, et juba kahe kliimatsükli läbimisel survetugevus väheneb rohkem kui veerandi võrra. Kuuse katsekehade tulemuste põhjal sama järeldada ei saa, konditsioneeritud katsekehade survetugevus on ligunemistsüklid läbinud katsekehade 8% väiksem.



Joonis 25. Männi katsekehade kolme grupi keskmised survetugevused.

Epoksiidvaiguga katmine suurendas männi katsekehade survetugevust ühel kuivamis ja ligunemistsüklil 189% ja kahel kuivamis ja ligunemistsüklil 251%. Leotamata katsekehadel suurendas epoksiidvaiguga katmine katsekehade survetugevust 134%.

Mõlema puidu puhul suurendas epoksiidvaiguga katmine katsekehade survetugevust, kuid suuremat mõju avaldas see kuuse katsekehadele. Kuuske peetakse ka tugevusnäitajate poolest veidi nõrgemaks puiduks kui mändi [26,27], mis tähendab, et ristikiudu survetugevuse näitel kuuse puidu epoksiidvaiguga katmine, muudab selle männi puiduga üsnagi võrdväärseks.

Leotamata katsekehadega tehti survekatsed juba seitse päeva pärast epoksiidvaiguga katmist, sest tootja juhend väidab, et see on täielikult kuivamise aeg. Teised katsekehade grupid said oluliselt kauem kuivada, läbides leotamise ja kuivamise tsükleid ning konditsioneerimise. Ei ole välistatud ka see, et kuumemal temperatuuril kuivatusahjus vaik kõveneb, ning tootja ei ole sellest teadlik. Samuti võib olla ka juhendis kirjutatud seitse päeva kuivamiseks liialt lühike aeg. Võrreldes leotamata katsekehade survetugevuste tulemusi, leotamise ja kuivatuse tsükleid läbinud katsekehadega, võib väita, et saadud tulemused on ebausaldusväärsed.

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistritöös uuriti epoksiidvaiguga töödeldud okaspuidu füüsikalis-mehaanilisi omadusi. Puitmaterjali tugevust mõjutavad kõige enam niiskus ja temperatuur, mille tulemusena muutuvad selle mehaanilised omadused. Niiskussisalduse suurenemisel puidus tekib soodne keskkond erinevatele kahjuritele ja seenkahjustustele. Sagedaste niiskumis- ja kuivamistsüklite tagajärjel tekivad puidule radiaalsuunalised pikipraod, mis mõjutavad selle kandevõimet. Epoksiidvaiku on juba aastakümneid kasutatud puidutööstuses peamiselt liimina, aga ka täiteainena. Lisaks vaigu headele mehaanilistele omadustele on sellel võime töötada niiskuse barjäärina, sest puit kapseldub vaiku ja puidu niiskumise kiirus tunduvalt väheneb. Epoksiidvaiguga puidu parandamise ja katmise praktilised meetodid on laialdaselt levinud Põhja-Ameerikas ja Kanadas, kuid teaduslikke uuringuid ja allikaid kasutatavate meetodite aluseks on väga vähe.

Magistritöö raames uuriti puidu lõhede mõju paindetugevusele ning võimalust epoksiidvaiguga neid parendada, et saavutada võimalikult lähedased tulemused kahjustusteta puidule. Lisaks uuriti epoksiidvaiguga kaetud ja katmata katsekehade niiskumist kuni kahe ligunemise ja kuivamise tsükli jooksul. Samade katsekehadega teostati ristikiudu survekatsed, selgitamaks välja leotamise tsüklite mõju vaiguga kaetud ja katmata katsekehadele.

Paindekatsed teostati 30 männi ja kuuse katsekehaga, mõõtmetega $20 \times 20 \times 300 \text{ mm}^3$. Kasutati kolme punkti paindekatseks universaalmasinat INSTRON 3369, mis oli seadistatud vastavalt standardile ISO 3133:1975. Paindekatsel oli puidu tõmbetsooni lõigatud $5 \times 5 \times 300 \text{ mm}^3$ suurune soon imiteerimaks puidu naturaalsel lõhenemisel ning kolmandikul katsekehadele oli lõigatud soon täidetud epoksiidvaiguga. Paindekatsete põhjal saab järeldada, et kuuse puitu soone lõikamine nõrgestab paindetugevust 42%, kuid männi katsekehadele soone lõikamine ei mõjutanud oluliselt tulemusi. Kuuse katsekehade soone täitmine epoksiidvaiguga taastas selle paindetugevuse sarnaseks tervik katsekehadele, kuid männi puhul on raske sarnast järeldust teha, sest kõigi kolme katsekehade grupi paindetugevused olid küllaltki sarnased. Katsete tulemused näitasid üsnagi suurt potentsiaali

puidu tugevdamiseks epoksiidvaiguga. Edasistes uuringutes tuleks katsekehade arvu suurendada ja võimalusel teostada katsed ka naturaalselt lõhenenud puittaladega.

Niiskussisalduse mõõtmine teostati 50 kuuse ja 50 männi katsekehaga, mille mõõtmeteks olid 20 x 20 x 75 mm³ vastavalt standarditele EVS-EN 322:2002 ja EVS-EN 317:2000. Niiskussisalduse katsete tulemusena saab väita, et epoksiidvaiguga katmine kaitseb puitu niiskumise eest ning säilitab katmiseelse niiskussisalduse. Pärast leotamise ja kuivatamise tsükleid, olid epoksiidvaiguga kaetud katsekehad kolm kuni viis korda väiksema niiskussisaldusega kui katmata puit. Edaspidisel uurimisel võiks teha katseid ka miinuskraadidel ja teostada tunduvalt rohkem ligunemise ja kuivatamise tsükleid, et uurida vaigu kihi vastupidavust. Epoksiidvaiguga katmist võiks võrrelda ka mõne teise puidu niiskuskindlaks töötlemise vahendiga.

Ristikiudu survekatsed teostati samade katsekehadega, millega leiti niiskussisaldus. Pärast 24-tunnist leotamist tõstis epoksiidvaiguga katmine katsekehade survetugevust vähemalt 89% võrreldes katmata katsekehadega. Kaks ligunemis- ja kuivatamistsüklit läbinud vaiguga kaetud katsekehade keskmine survetugevus tõusis vähemalt 151%. Katsekehad, mis ei läbinud leotamistsükleid, andsid küllaltki ebastandardseid tulemusi, sest ka ilma vaiguta katsekehadel oli survetugevus tunduvalt väiksem, kui leotus- ja kuivatus tsükleid läbinud katsekehadel. Leotamata katsekehad valmistati hiljem ja enne konditsioneerimist hoiti neid teistsugustes kliimatingimustes, mis mõjutas puidu omadusi. Epoksiidvaiguga kaetud leotamata katsekehade keskmine survetugevus oli kuni 130% suurem katmata katsekehades. Leotamata katsekehi oli võrreldes teiste gruppidega ka poole vähem, seega keskmiste tulemuste arvestamisel oli valim väiksem. Edaspidistel katsete teostamistel tuleks tähelepanu pöörata katsekehade samadel tingimustel ja korraga valmistamisele, sest epoksiidvaigu komponentide segamise osakaal ja kuivamistemperatuur mõjutavad tulemusi. Teostatud katsete tulemuste põhjal saab siiski järeldada, et sellisel meetodikal on küllaltki suurt potentsiaali epoksiidvaiguga puidu tugevdamiseks, kuid usaldusväärsemate tulemuste saavutamiseks oleks vaja tunduvalt rohkem katsekehasid.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] **Jin,F., Li,X.Park,S.** (2015) Synthesis and application of epoxy resins: A review, Vol. 29, 1-11lk.
- [2] **Lubin,G.** (1982) Handbook of Composites. Boston: Springer, Boston, MA. 743lk.
- [3] **Phillips,M. W.,Selwyn,J. E.** (1978) Epoxies for Wood Repairs in Historic Buildings. Washington: Office of Archeology and Historic Preservation, Heritage Conservation and Recreation Service, U.S. Dept. of the Interior, Technical Preservation Services Division. 67lk.
- [4] EPOXY RESINS AND CURING AGENTS Toxicology, Health, Safety and Environmental Aspects. (2006) PlasticsEurope Epoxy Resins Committee. [on-line] PlasticsEurope (17.04.2018).
- [5] **Stumes,P.** (1971) The Application of Epoxy Resins for the Restoration of Historic Structures – *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, Vol. 3, No. 1. 59-63lk.
- [6] **Vick,B. V.** (1999) Adhesive bonding of wood materials.Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. General technical report FPL. 9.1-9.24lk.
- [7] **Frigione,M., Naddeo,C.Acierno,D.** (2001) Cold-Curing Epoxy Resins: Aging and Environmental Effects. I: Thermal Properties. *Materials Engineering*. Vol. 21, No.1. 23-51lk.
- [8] **Leppert,C.** (1973) Health Hazards and Precautions for Epoxy Resin Systems in Electron Microscopy and Other Laboratory Uses. Vol 50. No. 9. 447-449lk.
- [9] **Lithner,D., Larsson,Å.Dave,G.** (2011) Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Science of The Total Environment*. Volume 409, Issue 18. 3309-3324lk.
- [10] Health, socio-economic and environmental aspects of possible amendments to the EU Directive on the protection of workers from the risks related to exposure to carcinogens and mutagens at work: 1-Chloro-2,3-epoxypropane (epichlorohydrin). (2011) Edinburgh: Institute of Occupational Medicine Download Publication.
ec.europa.eu/social/BlobServlet?docId=10177&langId=en.
- [11] **Zogh,M.** (2013) The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering. Florida: Taylor and Francis Group. 706lk.
- [12] **Joshi,S. V., Drzal,L. T., Mohanty,A. K.Arora,S.** (2004) Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? 371-376lk.
- [13] Entropy Resins Inc. Why Super Sap? [veebileht]
<https://entropyresins.com/why-use-super-sap/> (20.04.2018).

- [14] **Pizzo,B.,Smedley,D.** (2015) Adhesives for on-site bonding: Characteristics, testing and prospects, Vol. 97. 67-77lk.
- [15] **Lavisci,P., Berti,S., Pizzo,B., Triboulot,P.Zanuttini,R.** (2001) A shear test for structural adhesives used in the consolidation of old timber. Berlin: Holz als Roh- und Werkstoff. Springer- Verlag. 145-152lk.
- [16] **Radford,D. W., Van Goethem,D., Gutkowski,R. M.Peterson,M. L.** (2002) Composite repair of timber structures. New York: Elsevier Ltd. 417-425lk.
- [17] **Stumes,P.** (1975) Testing the Efficiency of Wood Epoxy Reinforcement Systems- *Bulletin of the Association for Preservation Technology*, Vol. 7, No. 3. 2-35lk.
- [18] **Rowell,M. R.** (1987) Treatments that EnhancePhysical Properties of Wood. Madison: Forest Products Laboratory. 12lk.
- [19] **Roos,A.** Puit ja puitmaterjalid
[\[http://mark.planet.ee/projekt/ruit/ruit_ja_puitmaterjalid.pdf\]](http://mark.planet.ee/projekt/ruit/ruit_ja_puitmaterjalid.pdf).
- [20] **Just,E. J., Õiger,K.Just,A.** (2015) Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid. Tallinn: TTÜ kirjastus. 431lk.
- [21] ISO 3133. (1975). Wood - Determination of ultimate strength in static bending. International standard , 2.
- [22] ISO 3132. (1975). Wood - Testing in compression perpendicular to grain. International standard, 2.
- [23] EVS-EN 322:2002. (2002). Puitplaadid. Niiskussisalduse määramine. Eesti standardikeskus.
- [24] EVS-EN 317:2000. (2000). Puitlaastplaadid ja puitkiudplaadid. Pundumise määramine paksuses pärast leotamist. Eesti standardikeskus.
- [25] EVS-EN 408:2010+A1:2012. (2012). Puitkonstruktsioonid. Ehituspuit ja liimpuit. Mõnede füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste määramine. Eesti standardikeskus.
- [26] **Lutdal,T.** (1997) Kjerneved av furu og lerk – Egenskaper og muligheter. Hovedoppgave: Inst. for skogfag, NLH. 88lk.
- [27] **Kúdela,J.,Kurjatko,S.** (2003) Wood structure and properties '02. Slovakia: Arbora Publishers.

LISAD

Lisa 1. Paindekatse kuuse katsekehade mõõtmed ja kaalud

	Katsekeha tähis	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)	Kaal (g)
Epoksiidvaiguga täidetud	K1	21,02	20,83	296,00	75,37
	K2	20,595	21,145	298,00	71,81
	K3	20,26	21,155	303,00	65,75
	K4	20,77	21,245	298,00	59,58
	K5	20,595	21,355	304,00	79,98
	K6	20,8	21,195	306,00	61,06
	K7	20,72	20,64	303,00	55,51
	K8	20,62	21,055	299,00	77,56
	K9	20,075	21,055	300,00	62,06
	K10	20,33	21,12	300,00	64,62
	Keskmine:	20,58	21,08	300,70	67,33
Soonega katsekehad	K1	20,09	19,98	304	46,31
	K2	20,14	19,92	301	45,37
	K3	20,11	20,38	300	45,42
	K4	20,24	20,4	300	45,69
	K5	20,31	20,4	300	47,53
	K6	20,38	20,22	302	47,04
	K7	20,21	20,3	303	46,21
	K8	20,23	20,34	300	45,53
	K9	20,26	20,29	301	46,66
	K10	19,93	20,37	300	43,35
	Keskmine:	20,19	20,26	301,1	45,911
Tervik katsekehad	K1	19,83	19,87	282	67,24
	K2	19,66	19,91	284	65,93
	K3	19,96	19,92	294	66,32
	K4	20,14	21,27	298	49,77
	K5	20,08	20,13	299	45,46
	K6	20,03	20,16	298	41,12
	K7	20,06	20,1	298	65,51
	K8	20,22	20,12	296	54,59
	K9	20,12	20,13	298	50,56
	K10	20,08	20,12	276	45,54
	Keskmine:	20,02	20,17	292,30	55,20

Lisa 2. Paindekatse männi katsekehade mõõtmed ja kaalud

	Katsekeha tähis	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)	Kaal (g)
Epoksiidvaiguga täidetud	M1	20,155	20,82	281,00	71,61
	M2	20,39	21,115	294,00	78,59
	M3	20,44	21,58	297,00	67,45
	M4	20,47	21,15	300,00	83,96
	M5	19,995	21,505	300,00	87,26
	M6	20,13	21,4	300,00	87,2
	M7	19,97	21,545	298,00	87,35
	M8	19,97	20,35	300,00	86,96
	M9	20,29	20,87	300,00	85,78
	M10	20,25	20,16	300,00	85,04
	Keskmine:	20,21	21,05	297,00	82,12
Soonega katsekehad	M1	19,59	20,32	298	69,94
	M2	19,44	20,35	299	68,38
	M3	19,75	20,22	300	70,77
	M4	20,14	20,44	299	70,65
	M5	19,54	20,42	300	69,43
	M6	20,26	20,22	300	70
	M7	20,11	20,62	299	68,22
	M8	20,43	20,55	299	69,58
	M9	20,28	20,32	300	50,47
	M10	20,25	20,3	300	50,45
	Keskmine:	19,979	20,376	299,4	65,789
Tervik katsekehad	M1	19,82	20,23	300	76,82
	M2	19,97	20,09	300	72,18
	M3	19,84	19,93	299	74,6
	M4	19,85	19,89	300	73,46
	M5	20	20,3	300	75,88
	M6	19,89	20,03	306	75,73
	M7	19,31	20,65	300	80,87
	M8	19,72	20,58	286	73,9
	M9	20,07	19,75	299	74,38
	M10	19,68	20,06	299	73,76
	Keskmine:	19,82	20,15	298,90	75,16

Lisa 3. Kuuse paindekatsete tulemused

Tabel 3-1 Kuuse tervik katsekehade paindekatsete tulemused.

Katsekeha tähis.	Maksimaalne paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tihedus (kg/m ³)
K1	124,6	15085,2	605,1
K2	133,3	15499,9	593,1
K3	99,3	13074,5	567,3
K4	67,7	8642,4	389,9
K5	61,8	6865,8	376,1
K6	55,4	8229,2	341,7
K7	106,3	12765,1	545,2
K8	89,7	9968,0	453,3
K9	62,8	9775,8	418,9
K10	66,1	8739,7	408,4
Keskmine:	86,7	10864,6	469,9

Tabel 3-2 Soonega nõrgestatud kuuse paindekatsete tulemused.

Katsekeha tähis.	Maksimaalne paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tihedus (kg/m ³)
K1	51,8	7086,3	404,4
K2	65,5	8089,2	400,6
K3	55,8	7539,3	393,4
K4	49,8	6117,7	392,6
K5	48,2	6222,8	406,9
K6	45,2	6105,2	402,2
K7	42,4	6873,2	395,6
K8	42,2	6132,9	392,7
K9	34,5	6548,2	401,4
K10	34,0	6512,7	379,3
Keskmine:	46,9	6722,8	396,9

Tabel 3-3 Epoksiidvaiguga täidetud kuuse paindekatsete tulemused.

Katsekeha tähis.	Maksimaalne paindetugevus (MPa)	Elastusmoodul (MPa)	Tihedus (kg/m ³)
K1	90,50	7529,4	581,5
K2	84,61	5965,0	553,3
K3	77,93	5952,6	506,3
K4	63,60	4799,6	453,1
K5	93,14	5029,0	598,2
K6	62,25	5719,3	452,6
K7	58,41	6861,3	428,4
K8	103,62	4791,1	597,5
K9	52,25	5793,2	489,4
K10	61,13	6774,3	501,7
Keskmine:	74,7	5921,5	516,2

Lisa 4. Kuuse paindekatse ühepoolse ANOVA testi tulemused

Varieeruvuse allikas	Hälvete ruutude summa S	Vabadusastmete arv v	Keskruut M	F-suhe	P-väärtus
Faktor	8,320.8458	2	4,160.4229	10,4954	0.0004
Viga	10,702.9240	27	396.4046		
Kokku	19,023.7698	29			

Lisa 5. Kuuse paindekatse post-hoc Tukey testi tulemused

Töötluste tüüp	Tukey HSD	Tukey HSD 2	Tukey HSD 3
Paar	Q-suhe	p-väärtus	Järeldus
Tervikmaterjal vs soonega	6,3143	0.0010053	p<0.01
Tervikmaterjal vs vaiguga	1,8986	0.3858390	p>0.05
Soonega vs vaiguga	4,4156	0.0114422	p<0.01

Lisa 6. Männi paindekatsete tulemused

Tabel 6-1 Männi tervik katsekehade paindekatsete tulemused.

Katsekeha tähis.	Maksimaalne paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tihedus (kg/m ³)
M1	113,6	15592,9	638,6
M2	108,1	14165,8	599,7
M3	105,4	14280,5	631,0
M4	115,6	15364,0	620,2
M5	107,4	12378,3	623,0
M6	100,3	13043,7	621,2
M7	121,5	13104,1	676,0
M8	121,5	14799,8	636,7
M9	116,9	14625,6	627,6
M10	118,2	15566,0	624,9
Keskmine:	112,9	14292,1	629,9

Tabel 6-2 Soonega nõrgestatud männi katsekehade paindetugevused.

Katsekeha tähis.	Maksimaalne paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tihedus (kg/m ³)
M1	117,1	13397,2	589,6
M2	99,3	11692,4	578,1
M3	116,5	13686,3	590,7
M4	100,7	12558,3	574,0
M5	110,1	12996,9	580,0
M6	103,5	12841,2	569,6
M7	105,1	12973,8	550,2
M8	101,3	12934,7	554,3
M9	64,9	6640,3	408,2
M10	69,3	7902,2	409,1
Keskmine:	98,8	11762,3	540,4

Tabel 6-3 Epoksiidvaiguga täidetud männi paindekatsete tulemused.

Katsekeha tähis.	Maksimaalne paindetugevus (MPa)	Elastsusmoodul (MPa)	Tihedus (kg/m ³)
M1	90,76	10641,2	607,3
M2	112,42	8840,0	620,9
M3	104,21	8853,8	514,9
M4	104,49	8846,2	646,4
M5	102,47	8864,8	676,4
M6	71,15	12621,5	674,7
M7	99,62	9173,6	681,3
M8	107,12	7578,9	713,3
M9	109,47	10861,2	675,2
M10	109,90	5794,9	694,4
Keskmine:	101,2	9207,6	650,5

Lisa 7. Männi paindekatse ühepoolse ANOVA testi tulemused

Varieeruvuse allikas	Hälvete ruutude summa S	Vabadusastmete arv v	Keskruut M	F-suhe	P-väärtus
Faktor	1,134.2226	2	567.1113	3,2744	0.0533
Viga	4,676.2731	27	173.1953		
Kokku	5,810.4957	29			

Lisa 8. Survekatsete kuuse katsekehade mõõtmised ja kaalud

Tabel 8-1 Survekatse kuuse katsekehade mõõtmised ja kaalud enne leotustsükleid.

	Katsekeha tähis	Kaal (g)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)	Niiskussisaldus %
Epoksiidvaiguga kaetud	K1	16,39	20,12	20,87	74,92	6,98
	K2	17,13	20,16	21,4	75,09	6,27
	K3	19,89	20,32	20,66	74,97	7,11
	K4	20,14	20,29	21,53	75,05	6,39
	K5	14,4	20,72	20,75	75,14	1,41
	K6	14,7	20,03	20,58	75,05	7,53
	K7	14,95	20,35	20,7	75	6,79
	K8	20,95	20,27	21	75,17	7,44
	K9	15,42	20,08	21,03	75,01	6,64
	K10	16,6	20,71	20,22	75,2	7,65
	K11	21,64	20,32	20,72	75,07	6,71
	K12	17,07	21,13	20,19	75,1	6,36
	K13	15,08	20,73	20,78	75,07	7,18
	K14	18,06	20,68	20,62	75,04	6,99
	K15	14,01	20,63	20,91	75,11	6,54
	K16	22,63	21,03	20,66	75,12	6,44
	K17	20,8	20,57	20,13	75,09	7,38
	K18	17,22	20,5	20,81	75,01	6,69
	K19	16,14	20,74	20,67	75,1	7,74
	K20	19,73	20,81	20,78	75,07	7,23
	Keskmine:	17,65	20,51	20,75	75,07	6,67
Katmata katsekehad	K21	11,55	20,41	20,06	75,01	10,84
	K22	11,71	20,15	20,22	74,96	10,89
	K23	11,23	20,21	20,1	75,16	10,64
	K24	11,61	20,34	19,98	75,04	10,89
	K25	11,3	20,14	20,22	75,1	10,46
	K26	11,07	20,03	20,25	75,25	11,03
	K27	10,99	20,1	20,2	75,26	10,67
	K28	11,17	20,16	20,21	75,09	10,92
	K29	13,47	20	20,21	75,09	11,14
	K30	11,69	20,04	20,24	75,07	11,12
	K31	11,76	20,13	20,16	75,18	11,15
	K32	11,13	19,96	20,25	75,04	11,19
	K33	12	20,22	20	75,06	11,11
	K34	11,43	20,19	19,99	74,93	11,30
	K35	11,66	20,27	19,89	75,17	10,94
	K36	11,23	19,93	20,27	74,96	10,86
	K37	11,51	20,06	20,15	75,02	11,10
	K38	12,14	19,95	20,4	75,01	10,97
	K39	11,79	20,36	19,84	75,09	11,12
	K40	11,43	19,97	20,36	75,22	11,19
	Keskmine:	11,5935	20,131	20,15	75,09	10,98

Tabel 8-2 Survekatse kuuse katsekehade mõõtmed ja kaalud peal 24 tunnist leotamist.

	Katsekeha tähis	Kaal (g)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)	Niiskussisaldus %
Epoksiidvaiguga kaetud	K1	17,14	20,26	20,89	75,02	11,88
	K2	17,94	20,17	21,45	75,11	11,29
	K3	20,78	20,33	20,68	75,08	11,90
	K4	20,88	20,3	21,55	75,11	10,30
	K5	14,88	20,71	20,78	75,19	4,79
	K6	15,24	20,06	20,59	75,08	11,49
	K7	15,77	20,36	20,72	75,03	12,64
	K8	21,94	20,28	21,03	75,2	12,51
	K9	16,02	20,07	21,13	75,07	10,79
	K10	17,43	20,74	20,38	75,2	13,04
	K11	22,45	20,33	20,73	75,08	10,70
	K12	17,65	21,13	20,2	75,13	9,97
	K13	15,92	20,75	20,8	75,17	13,15
	K14	18,59	20,69	20,65	75,07	10,13
	K15	14,39	20,64	20,93	75,19	9,43
	K16	23,15	21,05	20,67	75,13	8,89
	K17	21,78	20,58	20,16	75,16	12,44
	K18	17,98	20,53	20,83	75,16	11,40
	K19	17,11	20,74	20,69	75,37	14,22
	K20	20,34	20,82	20,81	75,14	10,54
	Keskmine:	18,37	20,53	20,78	75,13	11,07
Katmata katsekehad	K21	16,39	20,78	21,11	75,24	57,29
	K22	15,6	20,84	21,06	75,21	47,73
	K23	15,33	20,49	21,04	75,17	51,03
	K24	15,93	21,17	20,7	75,24	52,15
	K25	15,42	21,08	20,84	75,37	50,73
	K26	14,65	20,85	20,95	75,43	46,94
	K27	14,63	20,99	20,6	75,37	47,33
	K28	14,67	21,09	20,75	75,27	45,68
	K29	17,61	21,17	20,98	75,22	45,30
	K30	15,45	20,85	21	75,26	46,86
	K31	15,42	20,86	20,84	75,25	45,75
	K32	15,46	20,84	20,77	75,2	54,45
	K33	16,39	20,96	20,73	75,28	51,76
	K34	16,15	20,97	20,59	75,28	57,25
	K35	16,42	20,78	20,99	75,34	56,23
	K36	15,59	21,04	20,65	75,29	53,90
	K37	15,18	20,74	20,91	75,2	46,53
	K38	18,51	20,75	21,29	75,23	69,20
	K39	17,67	20,57	21,38	75,26	66,54
	K40	15,23	20,67	21,29	75,32	48,15
	Keskmine:	15,89	20,87	20,92	75,27	52,04

Tabel 8-3 Survekatse kuuse katsekehade mõõtmed ja kaalud peale 24 h leotamist ja kuivatamist temperatuuril 103 ± 2 °C.

	Katsekeha tähis	Kaal (g)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)
Epoksiidvaiguga kaetud	K1	15,32	19,79	20,85	74,95
	K2	16,12	19,98	21,42	75,08
	K3	18,57	20,28	20,62	74,95
	K4	18,93	20,25	20,52	75,02
	K5	14,2	20,25	20,26	74,9
	K6	13,67	19,87	20,56	75,02
	K7	14,00	20,31	20,65	75,05
	K8	19,5	19,8	20,89	75,09
	K9	14,46	20,06	20,93	75,04
	K10	15,42	20,47	19,82	75,18
	K11	20,28	19,87	21,04	75,05
	K12	16,05	21,00	19,97	74,95
	K13	14,07	20,6	20,69	75,02
	K14	16,88	20,61	20,43	75,07
	K15	13,15	20,52	20,65	75,05
	K16	21,26	20,96	20,62	75,11
	K17	19,37	20,41	20,03	75,01
	K18	16,14	20,08	20,69	75,01
	K19	14,98	20,38	20,52	75,07
	K20	18,4	20,57	20,66	75,07
	Keskmine:	16,54	20,30	20,59	75,03
Katmata katsekehad	K21	10,42	19,68	20,05	75,05
	K22	10,56	19,79	19,79	74,96
	K23	10,15	19,91	19,68	75,11
	K24	10,47	19,57	19,98	75,02
	K25	10,23	19,81	19,79	75,06
	K26	9,97	19,86	19,68	75,07
	K27	9,93	19,65	19,82	75,08
	K28	10,07	19,98	19,73	75,07
	K29	12,12	19,9	19,72	75,09
	K30	10,52	19,65	19,82	75,07
	K31	10,58	19,98	19,84	75,06
	K32	10,01	19,63	19,91	75,02
	K33	10,8	19,73	19,97	75,02
	K34	10,27	19,72	19,66	74,91
	K35	10,51	19,63	19,89	75,05
	K36	10,13	19,79	19,67	74,95
	K37	10,36	19,6	19,81	74,98
	K38	10,94	19,98	19,53	74,94
	K39	10,61	19,94	19,47	75,01
	K40	10,28	19,97	19,55	75,08
	Keskmine:	10,45	19,79	19,77	75,03

Tabel 8-4 Survekatse kuuse katsekehade mõõtmed ja kaalud peale 24h leotamist, kuivatamist ja uuesti 24 h leotamist.

	Katsekeha tähis	Kaal (g)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)	Niiskussisaldus %
Epoksiidvaiguga kaetud	K1	16,3	20,22	20,81	75,07	6,68
	K2	17,01	20,04	21,42	75,11	6,11
	K3	19,8	20,33	20,59	75,04	6,57
	K4	20,97	20,23	20,52	75,12	4,48
	K5	14,13	20,74	20,56	75,09	5,06
	K6	14,49	20,16	20,58	75,1	5,92
	K7	14,91	20,43	20,23	75,21	6,88
	K8	20,85	20,24	20,78	75,17	7,09
	K9	15,14	20,05	20,85	75,2	4,99
	K10	16,63	20,63	20,18	75,15	7,57
	Keskmine:	17,02	20,31	20,65	75,13	6,13
Katmata kastekehad	K21	16,52	20,98	21,02	75,29	58,69
	K22	16,33	20,96	20,66	75,27	54,93
	K23	16,06	20,99	20,5	75,2	58,38
	K24	16,64	20,63	21,1	75,13	59,54
	K25	15,89	20,96	20,74	75,13	56,55
	K26	15,76	20,88	20,76	75,2	58,23
	K27	15,28	20,77	20,9	75,15	54,66
	K28	15,84	21,07	20,6	75,19	57,46
	K29	18,53	20,89	20,73	75,32	53,14
	K30	16,33	20,76	20,90	75,25	55,38
	Keskmine:	16,32	20,89	20,79	75,21	56,70

Tabel 8-5 Survekatsete kuuse katsekehade mõõtmed ja kaalud peale kahekordset leotamist ja kuivatamist.

	Katsekeha tähis	Kaal (g)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)
Epoksiidvaiguga kaetud	K1	15,28	19,7	20,85	74,97
	K2	16,03	19,96	21,44	75,08
	K3	18,58	20,21	20,58	74,94
	K4	20,07	20,19	20,56	75,03
	K5	13,45	20,26	20,25	75
	K6	13,68	19,85	20,48	75,03
	K7	13,95	20,33	20,63	74,95
	K8	19,47	19,73	20,83	75,05
	K9	14,42	20,05	20,87	74,97
	K10	15,46	20,61	20,04	75,06
	Keskmine:	16,04	20,09	20,65	75,01
Katmata kastekehad	K21	10,41	19,77	20,12	75,19
	K22	10,54	19,87	19,86	75,17
	K23	10,14	19,72	19,86	75,14
	K24	10,43	19,59	19,97	75,1
	K25	10,15	19,83	19,84	75,12
	K26	9,96	19,88	19,77	75,05
	K27	9,88	19,62	19,83	75,06
	K28	10,06	19,98	19,79	75,08
	K29	12,1	19,95	19,83	75,09
	K30	10,51	19,73	19,94	75,07
	Keskmine:	10,42	19,79	19,88	75,11

Lisa 9. Survekatse männi katsekehade mõõtmised ja kaalud

Tabel 9-1 Survekatse männi katsekehade mõõtmised ja kaalud enne leotustsükleid.

	Katsekeha tähis	Kaal (g)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)	Niiskussisaldus %
Epoksiidvaiguga kaetud	M1	21,95	20,97	20,3	75,05	7,18
	M2	22,1	20,16	21,51	75,05	7,13
	M3	21,87	20,25	21,28	75,14	6,63
	M4	21,85	21,6	20,45	74,97	6,22
	M5	15,16	20,73	20,56	75,06	12,38
	M6	18,14	22,14	21,28	75,04	4,73
	M7	16,2	20,63	20,46	75,06	5,68
	M8	21,49	22,08	20,49	75,04	5,39
	M9	26,12	20,28	22	75,06	4,23
	M10	20,34	20,39	20,33	74,99	7,68
	M11	15,46	20,02	21,13	75,04	6,69
	M12	18,24	20,43	20,78	75,15	5,86
	M13	20,68	20,26	20,1	75,13	6,43
	M14	16,66	20,78	20,52	74,94	7,69
	M15	22,35	20,7	20,14	75	6,63
	M16	20,29	20,82	20,5	75,09	7,18
	M17	21,58	20,11	21,01	75,07	6,94
	M18	21,67	20,03	21,18	75,08	7,12
	M19	15,47	20,17	21,08	74,94	7,28
	M20	17,42	19,78	21,38	74,99	7,07
	Keskmine:	19,75	20,62	20,82	75,04	6,81
Katmata katsekehad	M21	17,34	19,95	20,06	74,99	9,40
	M22	16,09	19,92	20,42	75	9,38
	M23	17,07	20,26	20,09	75,08	9,21
	M24	17,26	20,22	20,08	75,05	9,24
	M25	17,08	19,96	20,01	75,09	9,63
	M26	16,63	20,2	20,02	75,05	9,48
	M27	17,18	20,18	20,26	75,11	9,64
	M28	17,28	20,15	20,08	75,04	9,44
	M29	17,12	20,16	20,01	74,98	9,96
	M30	17,41	20	20,09	74,98	9,57
	M31	17,02	20,04	19,97	74,97	9,24
	M32	17,16	20,05	19,98	75,21	9,65
	M33	17,53	20,07	20,11	75	9,63
	M34	17,39	20,06	20,27	75,07	9,44
	M35	16,82	20,01	20,12	75,08	9,43
	M36	17,39	20	20,16	75,02	9,58
	M37	17,15	19,93	19,94	75,07	9,65
	M38	17,53	20,01	19,86	75,02	9,63
	M39	17,56	20,08	20,05	75,03	9,27
	M40	17,68	20,13	20,04	75,02	9,61
	Keskmine:	17,1845	20,069	20,081	75,04	9,50

Tabel 9-2 Survekatse männi katsekehade mõõtmed ja kaalud peal 24 tunnist leotamist.

	Katsekeha tähis	Kaal (g)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)	Niiskussisaldus %
Epoksiidvaiguga kaetud	M1	22,69	20,99	20,32	75,06	10,79
	M2	22,96	20,18	21,51	75,06	11,29
	M3	22,7	20,25	21,29	75,14	10,68
	M4	22,6	21,63	20,46	75,05	9,87
	M5	15,6	20,75	20,57	75,07	15,64
	M6	18,28	22,15	21,3	75,08	5,54
	M7	16,54	20,64	20,47	75,07	7,89
	M8	21,89	22,09	20,52	75,04	7,36
	M9	26,28	20,29	22	75,07	4,87
	M10	21,18	20,41	20,35	75	12,12
	M11	16,03	20,02	21,11	75,06	10,63
	M12	18,77	20,43	20,8	75,17	8,94
	M13	21,06	20,27	20,13	75,14	8,39
	M14	17,24	20,79	20,53	75,06	11,44
	M15	22,7	20,72	20,14	75,02	8,30
	M16	21,01	20,82	20,52	75,1	10,99
	M17	22,34	21,11	21,03	75,09	10,70
	M18	22,55	20,04	21,19	75,12	11,47
	M19	16,11	20,18	21,1	74,99	11,72
	M20	17,99	19,8	21,4	74,98	10,57
	Keskmine:	20,33	20,68	20,84	75,07	9,96
Katmata katsekehad	M21	22,7	20,95	21,09	75,18	43,22
	M22	21,36	20,81	20,79	75,13	45,21
	M23	23,07	21,04	21,59	75,28	47,60
	M24	22,74	20,94	21,57	75,15	43,92
	M25	22,52	20,92	21,16	75,16	44,54
	M26	22,38	20,9	20,9	75,13	47,33
	M27	22,48	21,53	20,96	75,22	43,46
	M28	22,94	21,06	21,24	75,1	45,28
	M29	23,2	21,02	21,13	75,16	49,00
	M30	22,78	20,82	21,43	75,11	43,36
	M31	22,6	21,1	20,91	75,21	45,06
	M32	22,18	21,11	20,96	75,17	41,73
	M33	22,68	21,17	21,22	75,12	41,84
	M34	22,93	21,18	20,87	75,13	44,30
	M35	21,73	21,07	20,89	75,12	41,38
	M36	22,52	21,28	21,17	75,17	41,90
	M37	23,53	20,85	21,19	75,19	50,45
	M38	22,89	21,2	20,84	75,23	43,15
	M39	23,37	21,27	21,12	75,21	45,43
	M40	24,5	21,15	21,27	75,15	51,89
	Keskmine:	22,76	21,07	21,12	75,17	45,00

Tabel 9-3 Survekatse männi katsekehade mõõtmed ja kaalud peale 24 h leotamist ja kuivatamist temperatuuril 103 ± 2 °C.

	Katsekeha tähis	Kaal (g)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)
Epoksiidvaiguga kaetud	M1	20,48	20,77	20,29	74,98
	M2	20,63	19,98	21,43	74,96
	M3	20,51	20,08	21,21	75,13
	M4	20,57	21,52	20,48	74,98
	M5	13,49	20,7	20,54	75,04
	M6	17,32	22,14	21,13	75,04
	M7	15,33	20,56	20,37	75,07
	M8	20,39	22,06	20,43	75,06
	M9	25,06	20,27	21,97	75,04
	M10	18,89	20,35	20,32	74,96
	M11	14,49	20,01	21,12	75,04
	M12	17,23	20,37	20,73	75,14
	M13	19,43	20,2	19,92	75,13
	M14	15,47	20,45	20,47	74,93
	M15	20,96	20,67	20,13	74,98
	M16	18,93	20,82	20,47	75,08
	M17	20,18	20,08	20,83	75,07
	M18	20,23	19,87	21,16	75,07
	M19	14,42	20,17	21,04	74,92
	M20	16,27	19,76	21,38	74,94
	Keskmine:	18,51	20,54	20,77	75,03
Katmata katsekehad	M21	15,85	19,74	19,78	74,98
	M22	14,71	19,65	19,84	75
	M23	15,63	19,79	19,93	75,05
	M24	15,8	19,71	19,9	75,05
	M25	15,58	19,73	19,45	75,06
	M26	15,19	19,66	19,87	75,03
	M27	15,67	19,77	19,76	75,05
	M28	15,79	19,72	19,57	75,03
	M29	15,57	19,58	19,86	74,95
	M30	15,89	19,62	19,56	74,98
	M31	15,58	19,61	19,73	74,98
	M32	15,65	19,62	19,74	75,18
	M33	15,99	19,63	19,65	74,98
	M34	15,89	19,9	19,77	75,07
	M35	15,37	19,82	19,63	75,07
	M36	15,87	19,8	19,56	75,01
	M37	15,64	19,65	19,62	75,07
	M38	15,99	19,49	19,68	75,04
	M39	16,07	19,67	19,76	75,01
	M40	16,13	19,68	19,77	75,01
	Keskmine:	15,69	19,69	19,72	75,03

Tabel 9-4 Survekatse männi katsekehade mõõtmed ja kaalud peale 24h leotamist, kuivatamist ja uuesti 24 h leotamist.

	Katsekeha tähis	Kaal (g)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)	Niiskussisaldus %
Epoksiidvaiguga kaetud	M1	21,69	20,83	20,28	74,97	6,12
	M2	21,93	20	21,09	75	6,56
	M3	21,69	20,25	21,05	75,15	5,86
	M4	21,45	21,37	20,52	75,02	5,35
	M5	14,8	20,69	21,01	74,96	4,23
	M6	17,52	22,09	20,57	75,09	1,74
	M7	15,73	20,69	20,34	75,07	3,15
	M8	20,87	22,05	20,32	74,99	2,91
	M9	25,23	20,3	21,95	75,03	2,10
	M10	20,21	20,42	20,31	75,02	7,04
	Keskmine:	20,11	20,87	20,74	75,03	4,51
Katmata kastekehad	M21	25,45	20,93	21,31	75,15	60,67
	M22	22,99	21,01	20,8	75,15	56,29
	M23	25,44	21,02	21,71	75,19	63,08
	M24	25,49	21,13	21,64	75,24	62,25
	M25	25,04	20,91	21,27	75,15	60,82
	M26	23,97	20,98	20,96	75,25	58,01
	M27	25,5	21,96	20,96	75,18	62,84
	M28	25,45	21,06	21,33	75,11	61,59
	M29	25,06	21,32	21,07	75,15	60,95
	M30	25,48	21,52	20,89	75,15	60,45
	Keskmine:	24,99	21,18	21,19	75,17	60,69

Tabel 9-5 Survekatsete männi katsekehade mõõtmed ja kaalud peale kahekordset leotamist ja kuivatamist.

	Katsekeha tähis	Kaal (g)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Pikkus (mm)
Epoksiidvaiguga kaetud	M1	20,44	20,67	20,12	74,92
	M2	20,58	19,95	21,37	74,94
	M3	20,49	20,02	21,18	75,08
	M4	20,36	21,52	20,43	74,87
	M5	14,2	20,67	20,49	74,93
	M6	17,22	22,14	21,11	75,03
	M7	15,25	20,56	20,34	75,07
	M8	20,28	22,07	20,44	75,02
	M9	24,71	20,25	21,9	74,97
	M10	18,88	20,31	20,28	74,98
	Keskmine:	19,24	20,82	20,77	74,98
Katmata kastekehad	M21	15,84	19,62	19,93	75,02
	M22	14,71	19,92	19,78	75,08
	M23	15,6	19,67	20,1	75,03
	M24	15,71	19,62	20,12	75,05
	M25	15,57	19,68	19,71	75,06
	M26	15,17	19,7	19,86	75
	M27	15,66	20,33	19,62	75,04
	M28	15,75	19,69	20	75,08
	M29	15,57	19,92	19,79	75,06
	M30	15,88	20,08	19,47	75,07
	Keskmine:	15,55	19,82	19,84	75,05

Lisa 10. Kuuse katsekehade survekatsete tulemused

Tabel 10-1 Kuuse 24 h leotatud epoksiidvaiguga kaetud katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekeha nr.	$f_{c,90,max}$	$f_{c,90}$	Tihedus ρ
	(N)	(N/mm ²)	(kg/mm ³)
K11	8460,73	5,67	617,36
K12	6810,07	4,33	519,22
K13	5247,95	3,40	460,37
K14	6917,04	4,47	546,99
K15	4461,59	2,90	420,11
K16	7751,87	4,92	668,47
K17	7793,6	5,09	659,71
K18	7020,93	4,66	533,64
K19	3797,83	2,48	500,41
K20	6961,06	4,51	595,24
Keskmine:	6522,27	4,24	552,15

Tabel 10-2 Kuuse 24 h leotatud katmata katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekeha nr.	$f_{c,90,max}$	$f_{c,90}$	Tihedus ρ
	(N)	(N/mm ²)	(kg/mm ³)
K31	2085,7	1,39	400,28
K32	1731,02	1,18	384,03
K33	2027,35	1,37	411,05
K34	1921,37	1,30	397,01
K35	1870,55	1,27	403,04
K36	1864,56	1,26	391,08
K37	2025,68	1,38	399,82
K38	1716,32	1,15	419,60
K39	1868,41	1,25	408,64
K40	1942,64	1,30	393,01
Keskmine:	1905,36	1,29	400,76

Tabel 10-3 Kuuse 48h leotatud epoksiidvaiguga kaetud katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekeha nr.	$f_{c,90,max}$	$f_{c,90}$	Tihedus ρ
	(N)	(N/mm ²)	(kg/mm ³)
K1	5845,65	3,96	521,21
K2	6218,42	4,15	516,34
K3	8413,16	5,55	629,47
K4	9168,33	6,05	660,13
K5	4980,2	3,28	449,47
K6	4740,15	3,18	466,86
K7	4715,71	3,09	465,73
K8	7679,46	5,19	667,88
K9	4975,35	3,31	476,88
K10	6704,75	4,33	528,68
Keskmine:	6344,12	4,21	538,26

Tabel 10-4 Kuuse 48h leotatud katmata katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekeha nr.	$f_{c,90,max}$	$f_{c,90}$	Tihedus ρ
	(N)	(N/mm ²)	(kg/mm ³)
K21	1632,20	1,10	393,53
K22	1926,94	1,29	401,17
K23	1846,1	1,25	389,77
K24	1669,68	1,13	402,65
K25	1665,412	1,12	390,81
K26	1743,97	1,17	382,75
K27	1736,79	1,18	383,86
K28	1764,96	1,18	384,68
K29	1911,53	1,28	460,17
K30	1902,63	1,28	403,61
Keskmine:	1780,02	1,20	399,30

Tabel 10-5 Kuuse konditsioneeritud katsekehade survekatsete tulemused.

	Katsekeha nr.	$f_{c,90,max}$	$f_{c,90}$	Tihedus ρ
		(N)	(N/mm ²)	(kg/mm ³)
Katmata katsekehad	K41	1539,28	1,02	404,84
	K42	1787,63	1,18	390,96
	K43	1687,6	1,13	380,06
	K44	1661,21	1,09	372,36
	K45	1657,31	1,09	385,39
	Keskmine:	1666,61	1,10	386,72
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	K46	2389,41	1,57	447,53
	K47	2446,34	1,57	415,38
	K48	2649,43	1,76	485,16
	K49	2437,67	1,60	462,45
	K50	2660,59	1,75	470,17
	Keskmine:	2516,69	1,65	456,14

Lisa 11. Männi katsekehade survekatsete tulemused

Tabel 11-1 Männi 24h leotatud epoksiidvaiguga kaetud katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekeha nr.	$f_{c,90,max}$	$f_{c,90}$	Tihedus ρ
	(N)	(N/mm ²)	(kg/mm ³)
M11	5072,68	3,38	456,91
M12	4394,33	2,87	543,03
M13	7189,45	4,74	642,72
M14	5872,73	3,83	493,20
M15	9418,83	6,08	671,83
M16	6715,46	4,30	591,60
M17	8635,55	5,73	642,69
M18	8490,56	5,69	640,94
M19	5592,68	3,70	453,54
M20	6951,43	4,69	513,90
Keskmine:	6833,37	4,50	565,04

Tabel 11-2 Männi 24h leotatud katmata katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekeha nr.	$f_{c,90,max}$	$f_{c,90}$	Tihedus ρ
	(N)	(N/mm ²)	(kg/mm ³)
M31	3484,73	2,37	537,05
M32	2585,88	1,75	537,48
M33	3855,41	2,62	552,87
M34	3352,09	2,24	538,02
M35	3189,46	2,14	526,24
M36	3244,53	2,18	546,29
M37	4133,82	2,80	540,39
M38	3597,04	2,46	555,54
M39	3662,17	2,48	551,20
M40	3942,34	2,67	552,69
Keskmine:	3504,75	2,37	543,78

Tabel 11-3 Männi 48h leotatud epoksiidvaiguga kaetud katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekeha nr.	$f_{c,90,max}$	$f_{c,90}$	Tihedus ρ
	(N)	(N/mm ²)	(kg/mm ³)
M1	10624,02	6,86	656,02
M2	6379,45	4,27	644,15
M3	6843,89	4,55	643,62
M4	9043,63	5,61	618,53
M5	6146,41	3,97	447,46
M6	6482,59	3,90	491,06
M7	6791,97	4,40	485,77
M8	10220,67	6,17	599,25
M9	-	-	-
M10	8822,34	5,79	611,33
Keskmine:	7928,33	5,06	577,46

Tabel 11-4 Männi 48h leotatud katmata katsekehade survekatsete tulemused.

Katsekeha nr.	$f_{c,90,max}$	$f_{c,90}$	Tihedus ρ
	(N)	(N/mm ²)	(kg/mm ³)
M21	2894,6	1,97	539,97
M22	2926,71	1,96	497,25
M23	2960,97	2,01	525,88
M24	3263,55	2,22	530,27
M25	3617,5	2,45	534,77
M26	2238,96	1,52	516,99
M27	3137,91	2,06	523,19
M28	2893,31	1,96	532,70
M29	2618,09	1,75	526,19
M30	3400,15	2,26	541,07
Keskmine:	2995,18	2,01	526,83

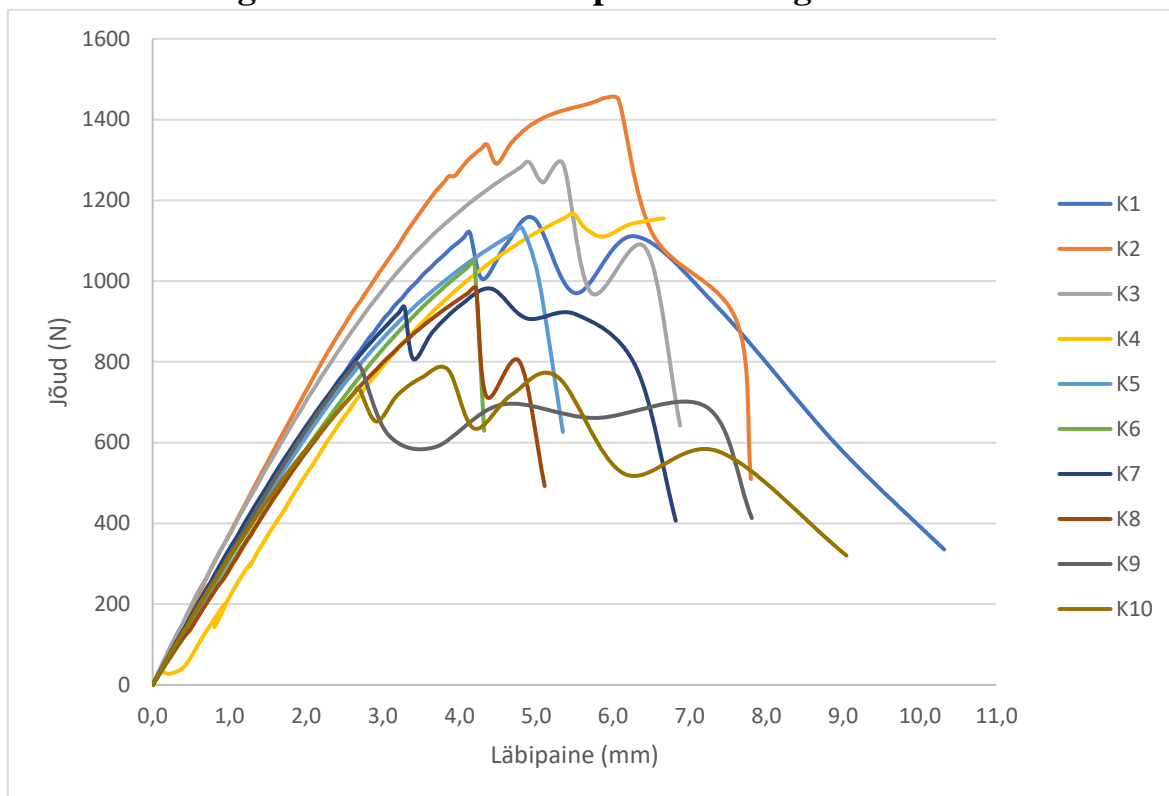
Tabel 11-5 Mäni konditsioneeritud katsekehade survekatsete tulemused.

	Katsekeha nr.	$f_{c,90,max}$	$f_{c,90}$	Tihedus ρ
		(N)	(N/mm ²)	(kg/mm ³)
Katmata katsekehad	M41	3996,03	2,66	590,78
	M42	5400,66	3,59	616,23
	M43	3023,89	2,01	593,89
	M44	5731,92	3,81	600,40
	M45	5482,44	3,65	611,04
	Keskmine:	4726,99	3,14	602,47
Epoksiidvaiguga kaetud katsekehad	M46	6439,15	4,26	688,42
	M47	4336,27	2,86	520,63
	M48	7306,42	4,84	658,00
	M49	7705,52	5,06	762,69
	M50	6295,53	4,20	627,18
	Keskmine:	6416,58	4,24	651,39

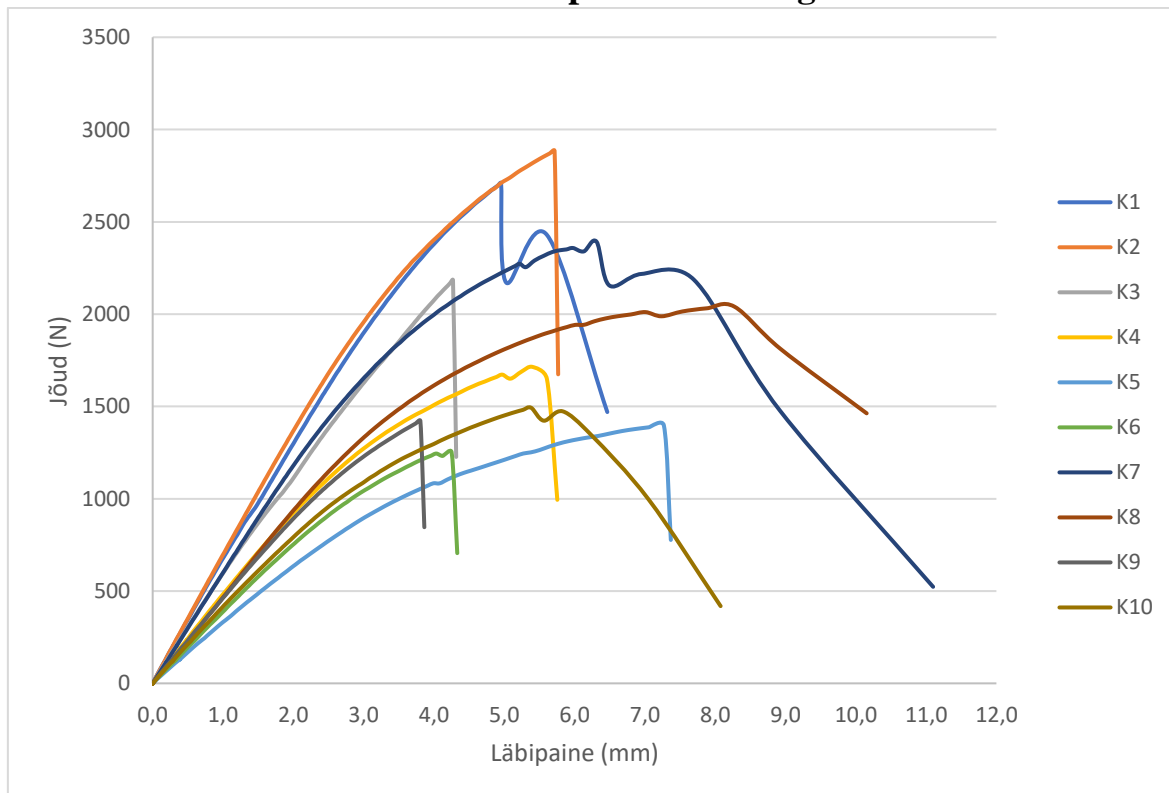
Lisa 12. Pildid survekatse epoksiidvaiguga kaetud proovikatsekehast peale 3 mm deformatsiooni rakendamist



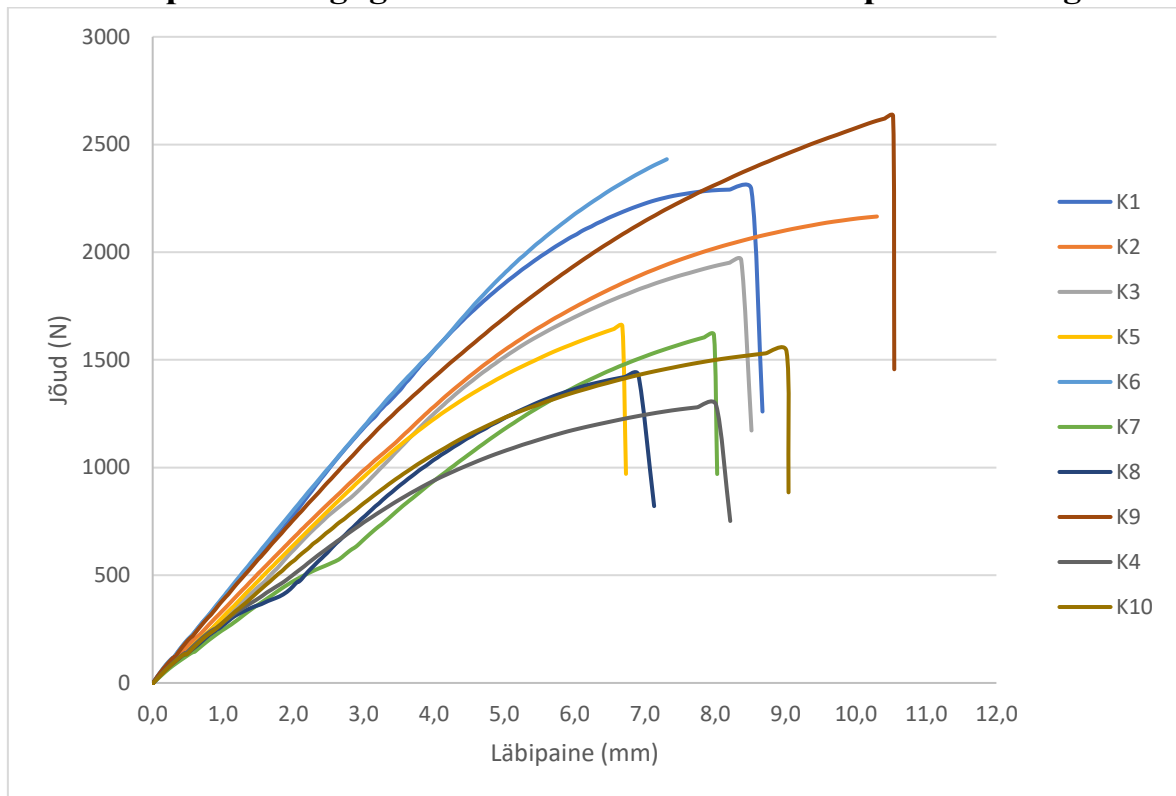
Lisa 13. Soonega kuuse katsekehade paindekatse graafik



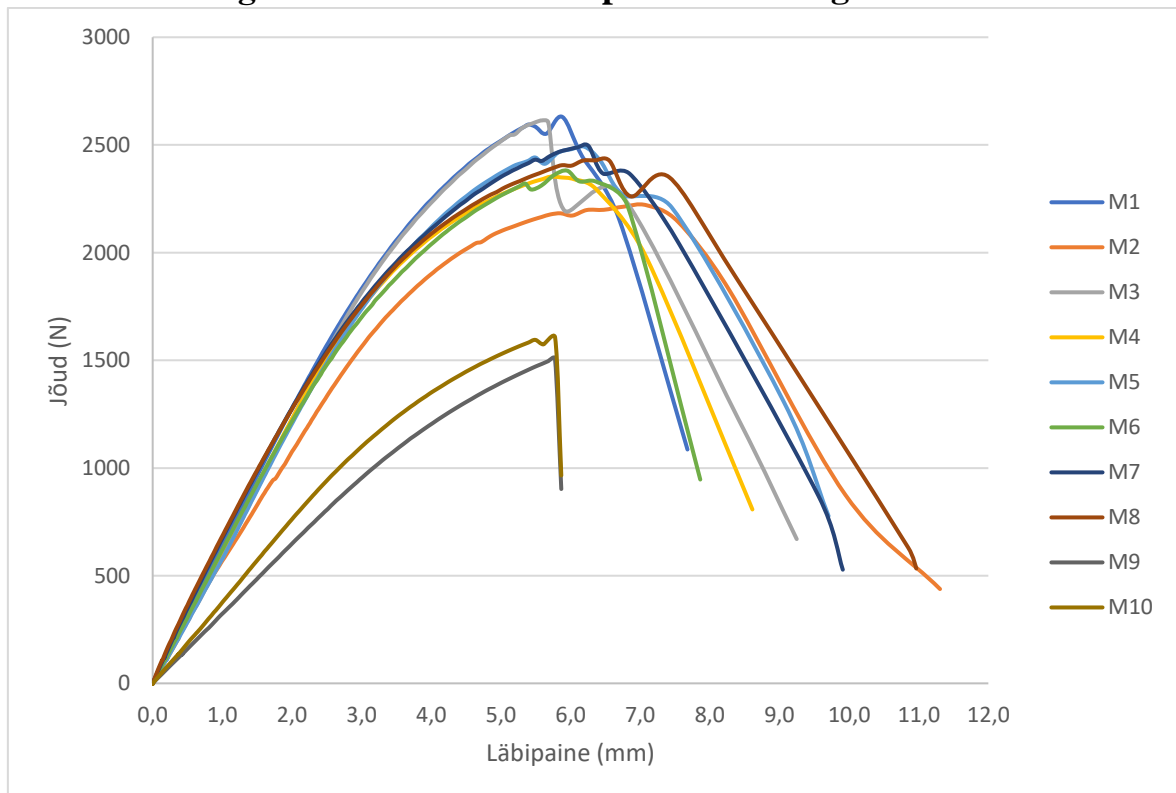
Lisa 14. Tervik kuuse katsekehade paindekatsete graafik



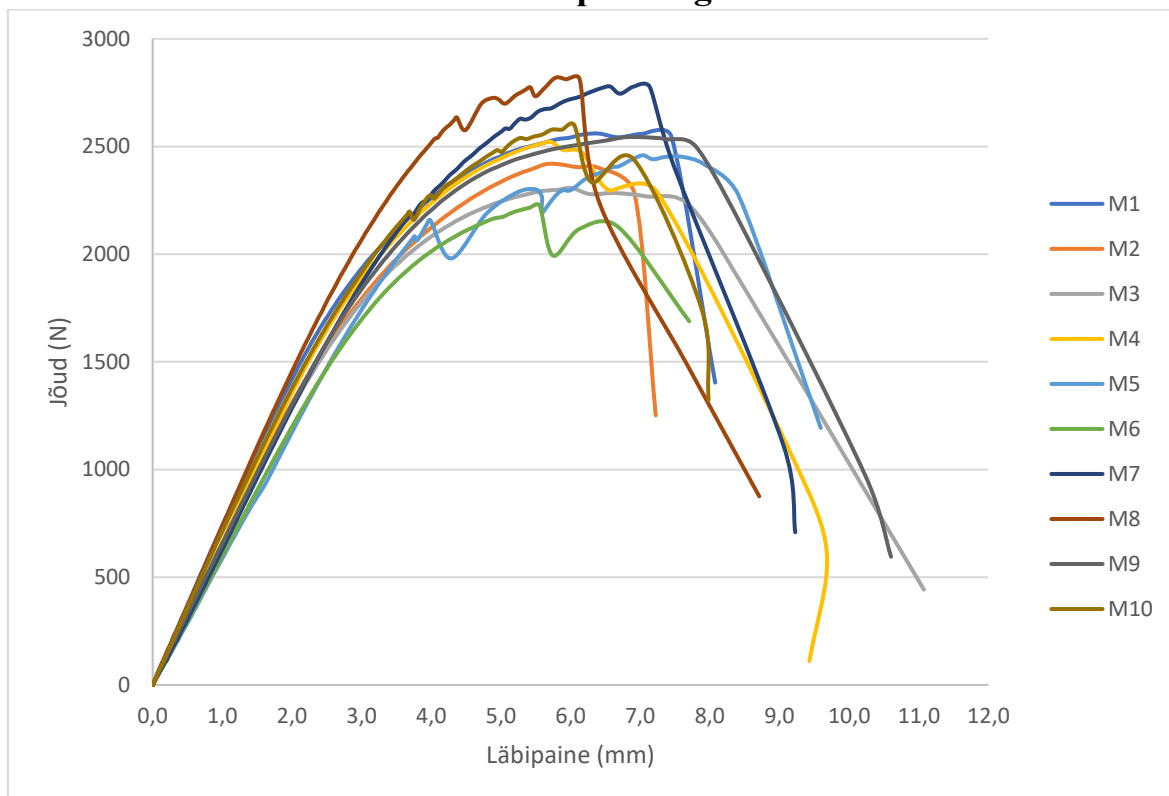
Lisa 15. Epoksiidvaiguga täidetud kuuse katsekehade paindekatse graafik



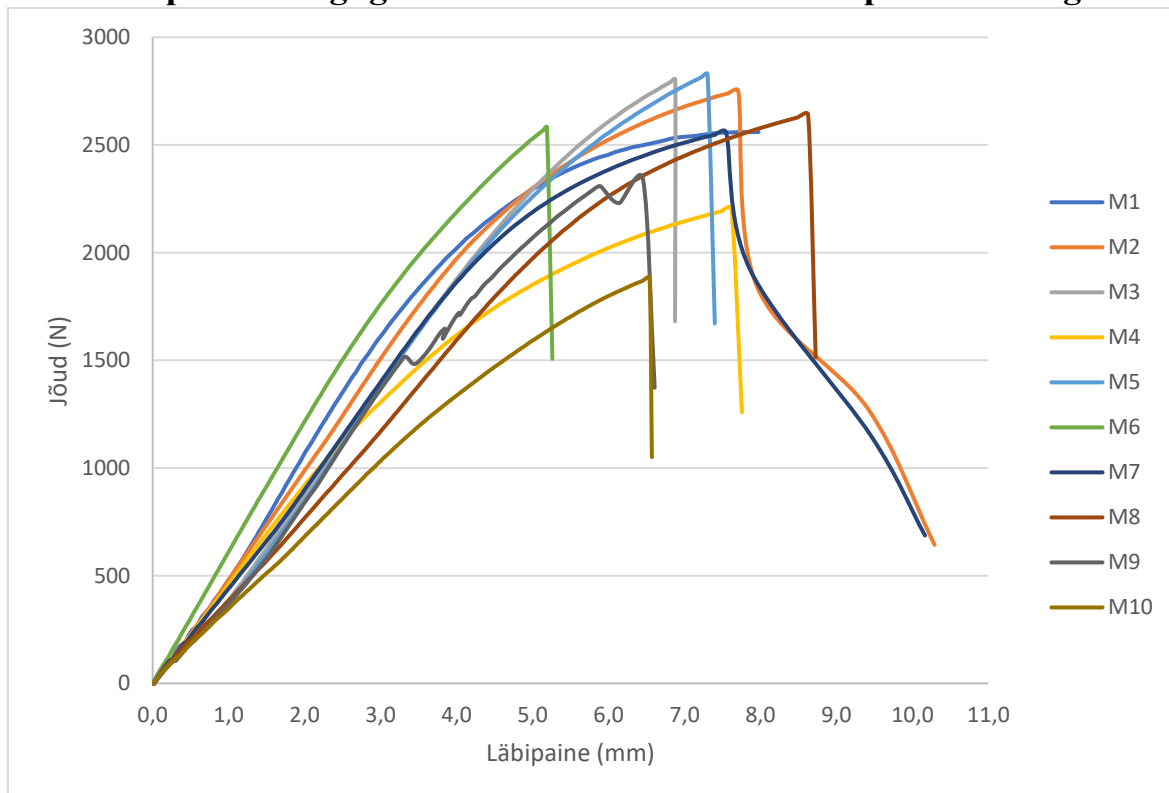
Lisa 16. Soonega männi katsekehade paindekatsete graafik



Lisa 17. Tervik männi katsekehade painde graafik

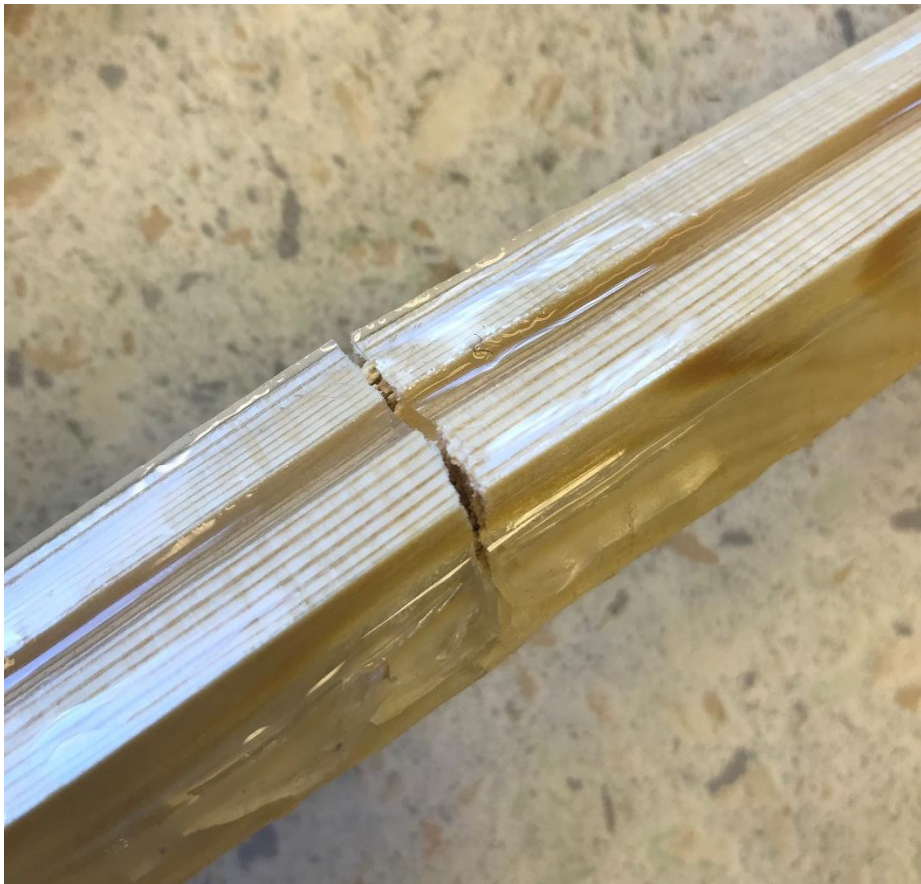


Lisa 18. Epoksiidvaiguga täidetud kuuse katsekehade paindekatse graafik

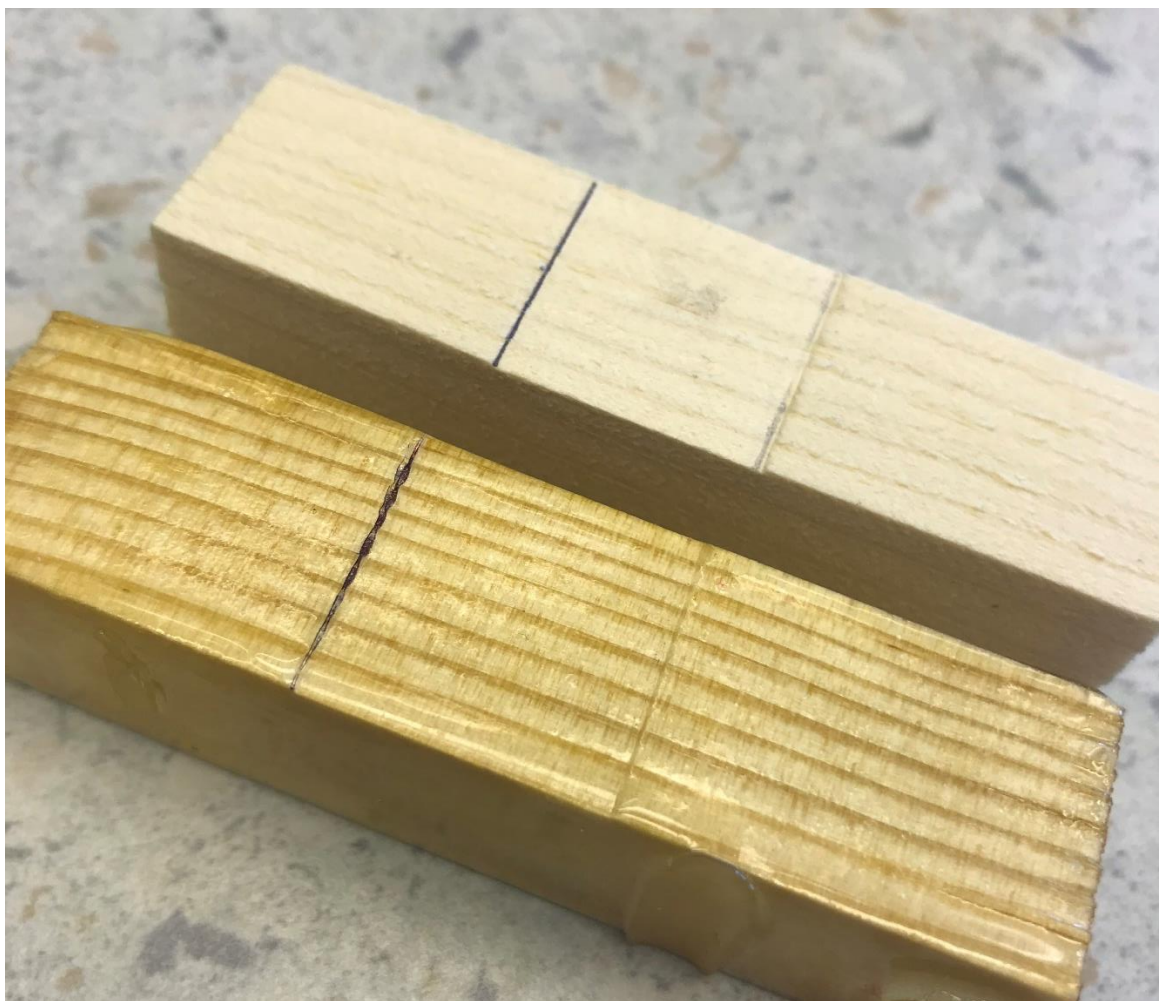


Lisa 19. Paindekatsese iseloomulikud purunemispildid





Lisa 20. Foto survekatsel deformeerunud epoksiidvaiguga kaetud ja katmata katsekehadest



Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Senni Vels,
(sünniaeg 04/10/92 49210042228)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Epoksiidvaigu mõju okaspuidu füüsikalise-mehaanilistele omadustele“, mille juhendaja on Marko Teder,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 28.05.2017

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)